

Stefan Lischke

**Auslegung und Test einer Crashbox
für Formelrennwagen**

Bachelorarbeit

Hochschule Mittweida
University of applied Sciences

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2010

Stefan Lischke

**Auslegung und Test einer Crashbox
für Formelrennwagen**

eingereicht als

Bachelorarbeit

An der

Hochschule Mittweida
University of applied Sciences

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2010

Erstprüfer: : Prof. Dr.-Ing. Frank Weidemann
Zweitprüfer: : Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Bibliografische Beschreibung	III
Vorwort	III
Schlagwörter	III
Beschreibung Formula Student/ Formula SAE	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Nomenklatur	IX
1. Einleitung	
1.1 Zielstellung	Seite 1 – 2
2. Vorbetrachtungen zum Variantenvergleich und zur Auswahl einer geeigneten Crashbox	
2.1 Komponenten einer Crashboxeinheit	Seite 3
2.2 Vergleich zwischen verschweißter und verschraubter AI-Platte	Seite 4
2.3 Benötigter Verformungsweg	Seite 5
2.4 Vorauswahl der Materialien	Seite 5
2.4.1 Aluminiumschaum	Seite 6
2.4.2 Aluminiumwabe	Seite 7
2.4.3 Kunststoffschaum	Seite 7
2.4.4 Stahl- und Aluminiumblech	Seite 8
2.4.5 Compositewerkstoffe	Seite 8
2.4.6 Ergebnisse der Vorauswahl	Seite 8
2.4.7 Grundlegendes zur Auslegung der Crashboxen	Seite 8
2.6 Grundlegendes zum Test der Crashboxen	Seite 9
2.7 Grundlegendes zur Auswertung der Crashtests	Seite 10
2.8 Grundlegendes zur Entscheidungsfindung einer geeigneten Crashboxvariante	Seite 10
2.9 Bauform Quader	
2.9.1 Crashboxen aus Aluminiumblech	Seite 11
2.9.2 Crashboxen aus Stahlblech	Seite 12
2.9.3 Vorteile der Bauform Quader	Seite 12
2.9.4 Nachteile der Bauform Quader	Seite 12
2.10 Bauform Pyramidenstumpf	
2.10.1 Crashboxen aus Aluminiumblech	Seite 15
2.10.2 Crashboxen aus Stahlblech	Seite 15
2.10.3 Vorteile gegenüber der Bauform Quader	Seite 16
2.10.4 Nachteile gegenüber der Bauform Quader	Seite 16

3.	Simulation- Anwendung und Beschreibung der Software	
3.1	Software	Seite 17
3.2	CAD-Software	Seite 17
3.3	Altair Hypermesh®	Seite 17
3.3.1	Vernetzen	Seite 18
3.4	Altair Hypercrash®	Seite 20
3.4.1	Materialeigenschaften des simulierten Modell	Seite 21
3.4.2	Lastfall	Seite 23
3.4.3	Beschleunigungsmesser	Seite 28
3.4.4	Berechnung und Auswertung der Simulation	Seite 28
4	Bewertung der Simulationsergebnisse	
4.1	Simulationsergebnisse der Bauform Quader	
4.1.1	Bauform Quader – Aluminiumblech -2,0mm	Seite 32
4.1.2	Bauform Quader – Aluminiumblech – 1,5mm	Seite 34
4.1.3	Bauform Quader – Material Stahlblech- 2mm	Seite 36
4.1.4	Bauform Quader – Material Stahlblech – 1,5mm	Seite 38
4.1.5	Bauform Quader – Material Stahlblech – 1,25mm	Seite 40
4.1.6	Bauform Quader– Material Stahlblech – 1,0mm	Seite 42
4.2	Simulationsergebnisse der Bauform Pyramidenstumpf	
4.2.1	Bauform Pyramidenstumpf – Material Aluminiumblech -2,0mm	Seite 44
4.2.2	Bauform Pyramidenstumpf – Material Aluminiumblech -1,5mm	Seite 46
4.2.3	Bauform Pyramidenstumpf – Material Stahlblech – 1,5mm	Seite 48
4.2.4	Bauform Pyramidenstumpf – Material Stahlblech – 1,25mm	Seite 50
4.2.5	Bauform Pyramidenstumpf – Material Stahlblech – 1,0mm	Seite 52
4.3	Auswertung der Simulation	Seite 54
5.	Experimentelle Untersuchung	
5.1	Der Testaufbau	Seite 55
5.2	Ergebnisse der Fallversuche	
5.2.1	Bauform Quader – Aluminiumblech -2,0mm	Seite 58
5.2.2	Bauform Quader – Stahlblech – 1,0mm	Seite 62
5.2.3	Bauform Pyramidenstumpf – Aluminiumblech – 2,0mm	Seite 65
5.2.4	Bauform Pyramidenstumpf – Stahlblech – 1,25mm	Seite 69
5.3	Auswahl der zu bevorzugenden Crashbox-Variante	Seite 71
6.	Zusammenfassung	Seite 73
	Anhang	
	Regelwerk der Formula Student	X
	Literaturverzeichnis	XII
	Zeichnungen	

Bibliographische Beschreibung

Lischke, Stefan:

Auslegung und Test einer Crashbox für Formelrennwagen- 2010. - 73 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau,

Bachelorarbeit, 2010

Vorwort

Ziel der Arbeit ist es, eine Crashbox für einen Formelrennwagen zu entwickeln und deren Funktion durch Simulation und Test zu gewährleisten. Neben der Funktionssicherheit ist die Kosteneffizienz ein wichtiger Bestandteil im vom Kostendruck stark beeinträchtigten Formelrennsport.

Ausgehend von der Konstruktion diverser Varianten mittels CAD-Software, folgt die Simulation mit FEM-Software. Die Ergebnisse der Simulation werden durch Crashtests verifiziert. Mit einem Bewertungssystem, ausgehend von folgenden Kriterien Gewicht, Preis, Ergebnisse der Simulation, Ergebnisse des Crashtests, Herstellbarkeit und Verfügbarkeit der Materialien, wird ermittelt, welche Crashbox für den Rennwagen die beste Variante darstellt.

Grundlage für die Auslegung stellen die Regelwerke der Formula SAE und der Formula Student dar.

Schlagwörter: Formula Student, SAE, Crashbox, Crashtest, Crashsimulation

Beschreibung Formula Student/ Formula SAE

Formula Student/ SAE ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb, bei dem Studenten in Eigenregie einen einsitzigen Rennwagen konzipieren, konstruieren und fertigen.

1981 wurde die Rennserie in den USA unter dem Namen „Formula SAE“ (Society of automotive Engineers) gegründet. Ziel ist es nicht einfach nur einen Rennwagen zu fertigen. Vielmehr geht es um die Anwendung und Darlegung von ingenieurwissenschaftlichen Fähigkeiten.

Der Gesamtsieg ist nicht allein von der schnellsten Zeit abhängig, wichtige Sachen wie Kosteneffizienz, Kraftstoffverbrauch und wissenschaftliche Darlegung der Konstruktion sind maßgebend für den Erfolg.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Rahmen des Rennwagens	Seite 1
Abbildung 2.	Bulkhead	Seite 2
Abbildung 3.	mögliche Länge einer Crashbox	Seite 2
Abbildung 4.	Crashboxeinheit in Explosionsansicht	Seite 3
Abbildung 5	Crashbox mit verschweißter AI-Platte nach simuliertem Aufprall	Seite 4
Abbildung 6	Crashbox mit verschraubter AI-Platte nach simuliertem Aufprall	Seite 4
Abbildung 7	Aluminiumschaum	Seite 6
Abbildung 8	Aluminiumwabe	Seite 7
Abbildung 9	Crashboxeinheit in Bauform Quader- CAD-Modell	Seite 11
Abbildung 10	Entstandener Spalt nach dem Schweißen	Seite 12
Abbildung 11	Entstandener Spalt nach dem Schweißen. (Vergrößerte Darstellung)	Seite 13
Abbildung 12	Seitenansicht der simulierten Crashbox	Seite 13
Abbildung 13	Spannungsverlauf über Baugruppe	Seite 14
Abbildung 14	Crashboxeinheit in Bauform Pyramidenstumpf- CAD-Modell	Seite 15
Abbildung 15	Seitenansicht der simulierten Crashbox in Bauform Pyramidenstumpf	Seite 16
Abbildung 16	Bildschirmansicht Altair® Hypercrash®	Seite 18
Abbildung 17	Menüansicht Vernetzen	Seite 19
Abbildung 18	Fertig vernetztes Modell	Seite 20
Abbildung 19	Startbildschirm Altair® Hypercrash®	Seite 20
Abbildung 20	Auswahl Materialmodell, Elastoplastisch nach Johnson &Cook	Seite 21
Abbildung 21	Eingabefenster der Materialkennwerte	Seite 22
Abbildung 22	Auswahlbildschirm Properties- gewählt Shellelement	Seite 23

Abbildung 23	Ridged Body & Boundary Conditions	Seite 24
Abbildung 24	Menüansicht Anfangsgeschwindigkeit mit ausgewählten Knotenpunkten	Seite 25
Abbildung 25	Modell mit dargestellter Geschwindigkeit	Seite 26
Abbildung 26	Modell mit Durchdringungen	Seite 27
Abbildung 27	Prallfläche mit Erfassungsbereich der Knoten	Seite 28
Abbildung 28	Für Simulation vollständig vorbereitetes Modell	Seite 29
Abbildung 29	Ausgabebildschirm HyperView® und Hypergraph®	Seite 30
Abbildung 30	Geschwindigkeitsverteilung während der Deformation für T=10ms	Seite 31
Abbildung 31	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 32
Abbildung 32	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 33
Abbildung 33	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 34
Abbildung 34	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 35
Abbildung 35	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 36
Abbildung 36	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation - Seitenansicht	Seite 36
Abbildung 37	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 37
Abbildung 38	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 38
Abbildung 39	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation- Seitenansicht	Seite 38
Abbildung 40	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 39
Abbildung 41	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 40
Abbildung 42	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation- Seitenansicht	Seite 40
Abbildung 43	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 41
Abbildung 44	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 42
Abbildung 45	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation-Seitenansicht	Seite 42

Abbildung 46	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 43
Abbildung 47	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 44
Abbildung 48	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 45
Abbildung 49	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 46
Abbildung 50	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 47
Abbildung 51	Simulierte Crashbox- Stahl- Materialstärke 1,5 mm	Seite 48
Abbildung 52	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 49
Abbildung 53	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 50
Abbildung 54	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 51
Abbildung 55	Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation	Seite 52
Abbildung 56	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 53
Abbildung 57	Fallturm	Seite 55
Abbildung 58	Messeinrichtung zur Ermittlung der angehängten Masse	Seite 56
Abbildung 59	Anzeigeeinheit der Waage	Seite 57
Abbildung 60	Ermittlung der Fallhöhe mittels Lasermessung	Seite 57
Abbildung 61	Haltemechanismus	Seite 58
Abbildung 62	Prallfläche	Seite 58
Abbildung 63	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 59
Abbildung 64	Crashbox während des Falltest	Seite 60
Abbildung 65	Einknicken der AI-Platte	Seite 60
Abbildung 66	Verformung der Crashbox	Seite 61
Abbildung 67	Bulkhead prallt auf Testplatte	Seite 61
Abbildung 68	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 62

Abbildung 69	Crashbox während Crashtest	Seite 63
Abbildung 70	Einknicken der AI-Platte	Seite 63
Abbildung 71	Verformung der Crashbox	Seite 64
Abbildung 72	Bulkhead prallt auf Testplatte	Seite 64
Abbildung 73	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 65
Abbildung 74	Crashbox nach dem Auftreffen auf Testplatte	Seite 66
Abbildung 75	Einknicken der Crashbox währen des Crashtest	Seite 67
Abbildung 76	Auftreffen der Knickstelle auf Prallfläche	Seite 68
Abbildung 77	Verformung der Crashbox	Seite 68
Abbildung 78	Vollständig abgebaute Geschwindigkeit	Seite 68
Abbildung 79	Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit	Seite 69
Abbildung 80	Vollständige Verformung nach Test- Draufsicht	Seite 70
Abbildung 81	Vollständige Verformung laut Simulation- Draufsicht	Seite 70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vorauswahl der Materialien	Seite 9
Tabelle 2	Auswahl der zu testenden Crashboxen	Seite 54
Tabelle 3	Bewertung der Masse	Seite 71
Tabelle 4	Bewertung der Spitzenbeschleunigung	Seite 71
Tabelle 5	Bewertung der mittleren Beschleunigung	Seite 71
Tabelle 6	Auswahl der zu bevorzugenden Variante	Seite 72

Abkürzungsverzeichnis

AI-Platte	Anti Intrusion Plate (deutsch: Anti-Eindringungs-Platte) Verhindert das Eindringen der Crashbox in den Fahrerraum
Pyramid.	Pyramidenstumpf
CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Elemente Methode
E-Modul	Elastizitätsmodul
FSAE	Formula SAE (Internationaler Konstruktionswettbewerb für Studenten)
SAE	society of automotive engineers (deutsch: Verband der Automobilingenieure)
FS	Formula Student (Bezeichnung des Formula Student Wettbewerb in Großbritannien)
FSG	Formula Student Germany (Bezeichnung des Formula Student Wettbewerb in Deutschland)
TMM	Technikum Mittweida Motorsport (Formula Student- Rennteam der Hochschule Mittweida)
M	Normgerechte Bezeichnung für metrische Schrauben Entspricht dem metrischen europäischen Einheitensystem

Nomenklatur

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Länge	l	[mm]
Länge der Crashbox aus Aluminiumschaum	$l_{\text{Aluminiumschaum}}$	[mm]
Maximal mögliche Länge einer Crashbox	l_{max}	[mm]
Breite	b	[mm]
Breite der Crashbox aus Aluminiumschaum	$b_{\text{Aluminiumschaum}}$	[mm]
Höhe	h	[mm]
Höhe der Crashbox aus Aluminiumschaum	$h_{\text{Aluminiumschaum}}$	[mm]
Benötigte Fallhöhe	h_{Fall}	[m]
Gemessene Fallhöhe	h_{Mess}	[m]
Beschleunigung	a	[g]
Zulässige Spitzenbeschleunigung,	$a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}$	[g]
Spitzenbeschleunigung – Ergebnisse der Simulation	$a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}$	[g]
Spitzenbeschleunigung – Ergebnisse der Crashtests	$a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}$	[g]
Zulässige mittlere Beschleunigung	$a_{\text{Mittelwert_zulässig}}$	[g]
Mittlere Beschleunigung – Ergebnisse der Simulation	$a_{\text{Mittelwert_Simulation}}$	[g]
Mittlere Beschleunigung – Ergebnisse der Crashtests	$a_{\text{Mittelwert}}$	[g]
Kraft	F	[N]
Maximale Masse einer Crashbox	m_{max}	[kg]
Zusätzliche Masse für Crashtest	m_{Zusatz}	[kg]
Gemessene Masse auf Fallturm	m_{Mess}	[kg]
Beschleunigung	a	[g]
Frequenz	f	[Hz]
Zeit	T	[s]
Benötigter Verformungsweg	s	[m]
Kraft:	F	[N]
Materialstärke	t	[mm]
Erdbeschleunigung	g	[m/s ²]

1. Einleitung

1.1 Zielstellung:

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Konstruktion und Auslegung einer Crashbox für einen Formelrennwagen. Die Crashbox ist eine Baugruppe, welche am vorderen Rahmen des Rennautos angebracht ist und bei einem Frontalaufprall die kinetische Energie in Verformungsenergie umwandelt und somit Fahrer und Fahrzeug schützt. Entsprechend der Vorgabe des Regelwerk, darf die Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}=40g$ und die mittlere Beschleunigung $a_{\text{Mittelwert_zulässig}}=20g$ nicht überschritten werden.¹ Die Box muss eine Mindestgröße (Länge $l=200\text{mm}$, Breite $b=200\text{mm}$, Höhe $h=100\text{mm}$) aufweisen.² Die Abmessungen der Box werden durch die Verkleidung und die Rahmenmaße des Rennwagens vorgegeben.

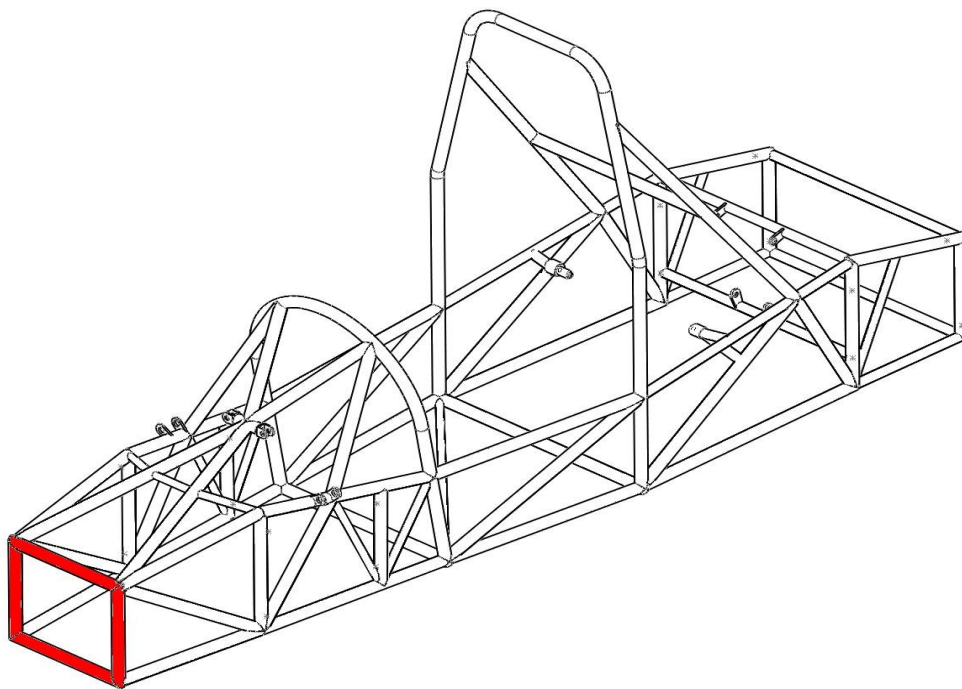


Abbildung 1: Rahmen des Rennwagens

In Abbildung 1 ist die vorderste Komponente des Stahlgitterrohrrahmens rot dargestellt. Dieser Teil wird als Bulkhead bezeichnet. Entsprechend der Regelwerke von FSAE und FS muss die Crashboxeinheit dort angebracht werden.³

1 Entsprechend Regelwerk B3.21.1 - Siehe Anhang X

2 Entsprechend Regelwerk B3.20.1 - Siehe Anhang X

3 Entsprechend Regelwerk B3.20.1 - Siehe Anhang X

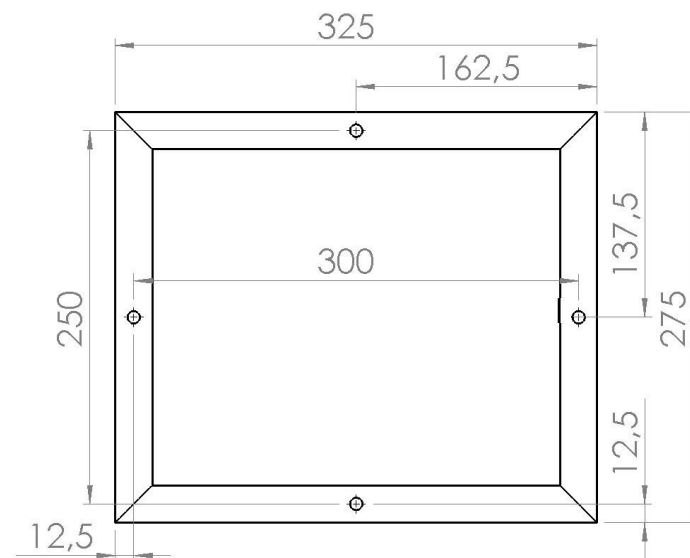


Abbildung 2: Bulkhead

Abbildung 2 zeigt das Bulkhead. Die äußeren Abmaße vom Bulkhead bestimmen die mögliche Größe einer Crashbox. Die 4 Bohrungen dienen der Befestigung der Crashboxeinheit.

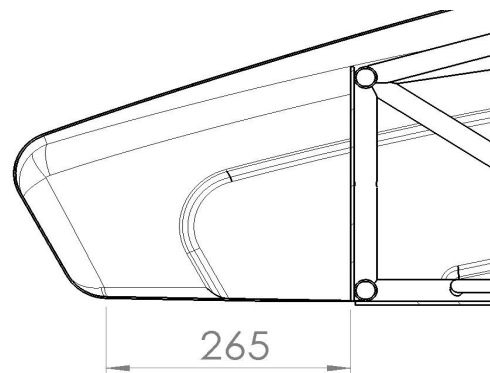
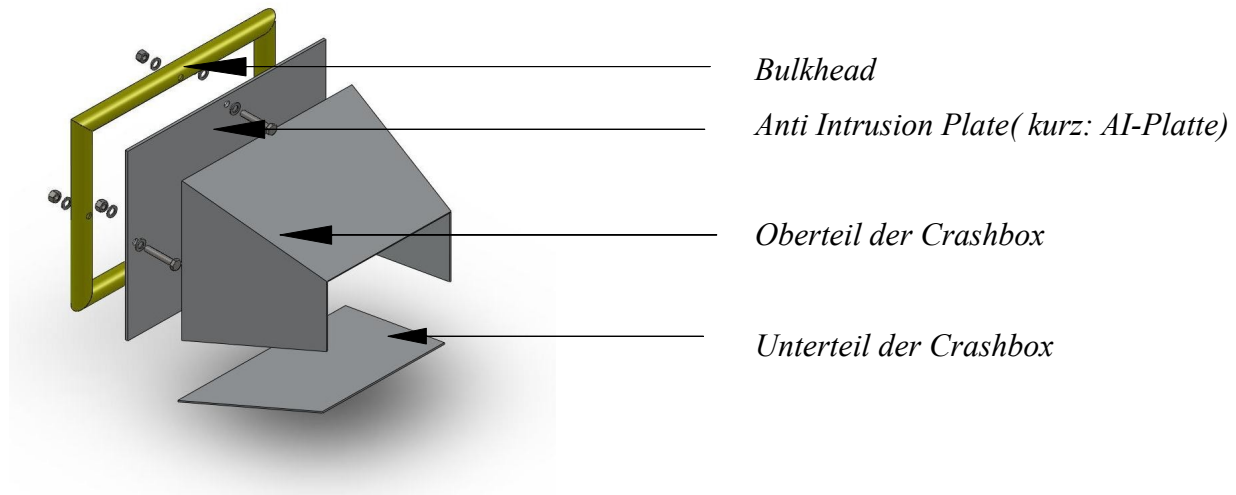


Abbildung 3: Mögliche Länge einer Crashbox

Die Länge von $l_{\max}=265$ mm soll nicht überschritten werden, da sonst die Verkleidung des Rennautos mit der Crashbox in Berührung kommt (siehe Abbildung 3). Die Masse der Box soll $m_{\max}=3,0\text{kg}$ nicht überschreiten, um ein niedriges Gesamtgewicht des Rennautos zu erhalten. Bei der Auslegung der Crashbox ist auf Kosteneffizienz, einfache Herstellung und Reproduzierbarkeit zu achten.

2 Vorbetrachtungen zum Variantenvergleich und zur Auswahl einer geeigneten Crashbox

2.1 Komponenten einer Crashboxeinheit



Bulkhead

Dabei handelt es sich um den Teil des Stahlgitterrohrrahmens des Rennwagens an dem die Crashboxeinheit angebracht wird (in Abbildung 1 auf Seite 1 rot markiert). Die Größe des Bulkhead ist von der Konstruktion des Rahmens abhängig.

AI-Platte

Die Anti Intrusion Plate (im weiteren AI-Platte genannt) dient dem Fahrerschutz. Es wird damit ein etwaiges Eindringen der Crashbox in den Fahrerraum verhindert. Entsprechend des Regelwerks muss die AI-Platte aus Stahlblech mindestens eine Materialstärke von $t=1,5$ mm oder eine aus Aluminiumblech mindestens eine von $t=4$ mm haben.⁴

Oberteil der Crashbox

Die Aufgabe dieses Bauteils ist die kinetische Energie durch Verformungsarbeit abzubauen und somit Fahrer und Fahrzeug vor Verletzungen und Schäden zu schützen. Hier sind die Mindestmaße Länge $l=200$ mm, Breite $b=200$ mm, Höhe $h=100$ mm gegeben. Die zum Einsatz kommenden Materialien werden im Regelwerk nicht vorgegeben.

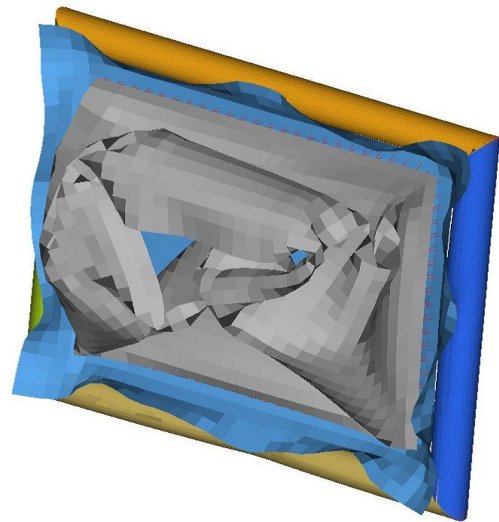
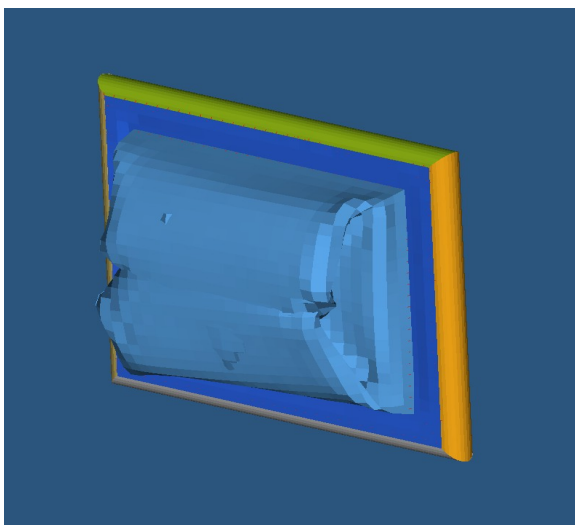
Unterteil der Crashbox

Ausschließlich bei Crashboxen aus Blech wird dieses Bauteil benötigt. Es schließt die Form, so dass eine optimale Verformung stattfinden kann.

⁴ Entsprechend Regelwerk B3.20.4 - Siehe Anhang X

2.2 Vergleich zwischen verschweißter und verschraubter AI-Platte

Die AI-Platte kann mit dem Bulkhead verschraubt oder verschweißt werden. Wird die AI-Platte verschweißt, so muss diese bis zur Mittellinie der Bulkheadrohre reichen. Eine verschraubte AI-Platte muss mindestens die äußeren Abmaße des Bulkhead haben.⁵ In Abbildung 5 und 6 ist die Simulation einer verschweißten und verschraubten Crashboxeinheit zu sehen. Als Material der Crashbox wurde allgemeiner Baustahl S235JR verwendet und die Materialstärke ist $t=1,25\text{mm}$. Das Ergebnis der Simulation der verschweißten Platte ist $a_{\text{Spitzenwert}}=25,2\text{g}$. Eine Crashbox mit gleichen Materialeigenschaften, jedoch verschraubter AI-Platte erreicht in der Simulation $a_{\text{Spitzenwert}}=27,57\text{g}$.



Vorteile einer verschweißten gegenüber einer verschraubten AI-Platte

Der Vorteil einer verschweißten AI-Platte ist, dass diese beim Aufprall weniger in den Fahrerraum eindringt und eine bessere Krafteinleitung in den Rahmen gewährleistet. Kräfte werden dabei besser über die gesamte Fläche der AI-Platte übertragen. Bei einer verschraubten AI-Platte geschieht das nur punktuell in dem Bereich, wo die AI-Platte am Bulkhead befestigt ist.

Nachteile einer verschweißten gegenüber einer verschraubten AI-Platte

Nachteil einer verschweißten AI-Platte ist, dass im Falle eines leichten Unfalls die Crashbox-Einheit nicht einfach ausgetauscht werden kann. In diesem Fall wäre es nötig die Schweißnaht durch Zerstörung zu entfernen, weil Schweißen ein stoffschlüssiges Verfahren ist. Der Rahmen des Fahrzeugs würde dadurch Schaden nehmen.

⁵ Entsprechend Regelwerk B3.20.4 – Siehe Anhang X

Entscheidung

Aufgrund der geringen Unterschiede der Spitzenbeschleunigungen, der Nachteile und der Tatsache, dass ein Verschweißen nur bei Crashboxen aus Stahl in Frage kommt, wird eine Crashbox mit verschraubter Al-Platte verwendet.

2.3 Benötigter Verformungsweg

Nach den Anforderungen des Regelwerkes muss eine Crashbox eine Mindestlänge von $l=200\text{mm}$ haben. Die benötigte Länge, damit eine Beschleunigung von $a=20g$ nicht überschritten wird ist:

$$\begin{array}{lll}
 a_{\max} = a \cdot g & a_{\max} = 20 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 & a_{\max} = \underline{196,2 \text{ m/s}^2} \\
 T = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} & T = \frac{7 \text{ m/s}}{196,2 \text{ m/s}^2} & T = \underline{0,0357 \text{ sec}} \\
 s = \frac{a \cdot T^2}{2} & s = \frac{20 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,0357 \text{ sec}^2}{2} & s = \underline{\underline{0,125 \text{ m} = 125 \text{ mm}}}
 \end{array}$$

Zu beachten ist, dass a hier als Faktor 20 dient.

2.4 Vorauswahl der Materialien

Das Material, aus dem eine Crashbox gefertigt wird, muss die kinetische Energie durch Deformation aufnehmen. Dabei findet eine Belastung über den elastischen Bereich hinaus in den plastischen Bereich hinein statt. Mögliche Materialien für eine Crashbox sind Aluminiumschaum, Aluminiumwaben, Kunststoffschäume, Stahl- und Aluminiumbleche und Strukturen aus Compositewerkstoffen wie Carbonegewebe und Aramidgewebe. Zu beachten ist, dass die Crashboxen sich auch bei seitlicher oder vertikaler Belastung nicht vom Rahmen lösen dürfen.⁶

⁶ Entsprechend Regelwerk B3.20.2 – Siehe Anhang X

2.4.1 Aluminiumschaum

Aluminiumschaum ist ein Leichtbaumaterial mit guten Dämpfungseigenschaften und wird häufig für Crashelemente verwendet. Eine Crashbox aus Aluminiumschaum wurde bereits bei zwei Rennwagen des Technikum Mittweida Motorsport (TMM), dem Formula Student-Team der Hochschule Mittweida, verwendet. Die folgenden Angaben basieren auf den Erfahrungswerten von TMM. Aluminiumschaum kann bis zu 50% komprimiert werden. Da ein Verformungsweg von $s=125\text{mm}$ vorhanden sein muss, ergibt sich eine nötige Gesamtlänge der Crashbox von $l_{\text{Aluminiumschaum}}=250\text{mm}$, womit die Crashbox 50mm länger als die Mindestanforderung des Regelwerkes ist. Bedingt durch die Materialeigenschaften ist eine Crashbox aus diesem Material mit einer Breite $b_{\text{Aluminiumschaum}}=255\text{mm}$ und einer Höhe $h_{\text{Aluminiumschaum}}=155\text{mm}$ größer als die Mindestanforderung des Regelwerkes. Zudem beträgt die Masse der Box $m=3,040\text{kg}$. Aluminiumschaum ist ein kostenintensiver Werkstoff und kann nur über wenige Anbieter, welche sich auf die Herstellung dieses Materials spezialisiert haben, bezogen werden.



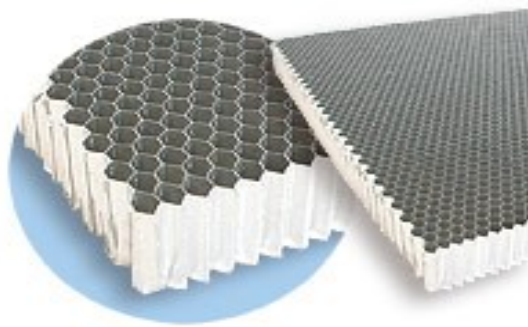
Abbildung 7: Aluminiumschaum

Quelle: www.scienceblogs.de/mathlog/Aluminium_foam.jpg

(entnommen am 14.05.2010)

2.4.2 Aluminiumwabe

Aluminiumwaben sind kostenintensive Werkstoffe, die leicht sind und gute Dämpfungseigenschaften bieten. Die Crashbox muss entsprechend der Vorgabe des Regelwerks sicher an der AI-Platte befestigt werden. Dabei darf sie sich auch bei seitlicher Belastung nicht lösen. Crashelemente aus Aluminiumwaben müssen mit speziellen Klebstoffen an der Platte befestigt werden. Durch die feine Struktur entstehen schnell leichte Deformationen im Randbereich von Crashboxen aus Aluminiumwaben. Dies schadet nicht der Funktionssicherheit, aber es ergibt sich ein unerwünschtes Erscheinungsbild.



Quelle:

www.celcomponents.com/ted/img/pannelli_sandwich/alveolare_alu.jpg

(entnommen am 14.05.2010)

2.4.3 Kunststoffschaum

Kunststoffschäume bieten ein gutes Dämpfungsverhalten und sind günstig zu beschaffen. Die Berechnung und Simulation von Schäumen führt schnell zu Abweichungen und fehlerhaften Ergebnissen, was an dem Materialmodell für Schäume liegt. Entsprechend des Regelwerkes sind Kunststoffschäume in Metallboxen einzufassen, wodurch die Simulation komplexer wird, da hierbei Komponenten mit unterschiedlichen Materialmodellen simuliert werden müssen. Kunststoffschäume werden als Volumenmodell simuliert und Metallboxen als Schalenelement. Boxen aus Kunststoffschaum müssen mittels Klebstoffen an der AI-Platte befestigt werden. Durch die geringe Festigkeit von Kunststoffschaum müssen besonders große Crashelemente gefertigt werden, um die geforderten maximalen Beschleunigungswerte vom Regelwerk einzuhalten.

2.4.4 *Stahl- und Aluminiumbleche*

Stahl- und Aluminiumbleche sind Werkstoffe, die günstig innerhalb kurzer Zeit zu beschaffen sind. Sie sind einfach und günstig umzuformen und ein sicheres Befestigen an der AI-Platte wird mittels Schweißverfahren gewährleistet. Die Simulation des Crashtest liefert dank einfacher Materialmodelle, als Schalenelemente, exakte Ergebnisse. Durch die Verwendung von Schalenelementen lassen sich unterschiedliche Materialstärken für weitere Simulationen schnell verändern.

2.4.5 *Compositewerkstoffe*

Compositewerkstoffe zeichnen sich durch geringes Gewicht und hohe Festigkeit aus. Eine Crashbox aus Compositewerkstoffen dient bei einem Rennwagen gleichzeitig als Teil der Verkleidung. Somit kann die äußere Form der Box das Aussehen des Rennwagens beeinflussen. Die Simulation ist komplex, da die Richtung der unterschiedlichen Lagen und Fasern beachtet werden muss. Die Herstellung der Box ist aufwändig, da zuerst eine Negativ-Form anzufertigen ist. Wichtig beim Legen der Lagen ist das Einhalten der ermittelten Winkel der Faserrichtung. Nach dem Legen ist eine Nachbehandlung im Autoklaven nötig. Compositewerkstoffe sind kostenintensive Werkstoffe, die bei Zerstörung splintern und somit eine weitere Gefahrenquelle durch umher fliegende Splitter und scharfe Bruchkanten darstellen.

2.4.6 *Ergebnisse der Vorauswahl*

Die Materialien die für Crashelemente in Fragen kommen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es sind je Eigenschaft maximal 5 Punkte zu vergeben. Das Material mit den besten Eigenschaften erhält 5 Punkte, mit abnehmender Qualität der Eigenschaften wird jeweils 1 Punkt weniger vergeben. Das Material welches am Ende die meisten Punkte in Summe hat, maximal sind 30 Punkte möglich, ist das für die Crashbox zu bevorzugende Material.

Tabelle 1: Vorauswahl der Materialien

Material	Kosten-effizienz	Beschaffung	Simulations-Aufwand	Gewicht	Größe	Herstellbarkeit	Summe
Aluminium-Schaum	3	2	3	2	3	4	<u>17</u>
Aluminium-wabe	3	2	4	5	4	4	<u>22</u>
Kunststoff-schaum	4	4	3	4	1	3	<u>19</u>
Aluminium-und Stahlblech	5	5	5	3	4	5	<u>27</u>
Composite-werkstoffe	2	3	2	4	2	2	<u>15</u>

Die Wahl der Materialien für die Boxen fiel auf Bleche aus allgemeinem Baustahl (S235JR) und Aluminium (AlMg3), da hier 27 von 30 möglichen Punkten erreicht wurden.

2.5 Grundlegendes zur Auslegung der Crashboxen

Der Rennwagen wird unter Zuhilfenahme der CAD-Software SolidWorks® konstruiert. Die Modelle der Crashboxen werden ebenfalls mit dieser CAD-Software erstellt. Sie werden in einem Austauschformat, in diesem Falle .igs gesichert und mit der Software Altair® Hypermesh® vernetzt. Mit der Software Altair® Hypercrash® werden die Modelle für die Crashsimulation weiterverarbeitet und die benötigten Parameter zum Modell hinzugefügt. Nach der Berechnung werden dann die Ergebnisse in Altair® Hyperview® und Altair® Hypergraph® dargestellt und ausgewertet.

2.6 Grundlegendes zum Test der Crashboxen

Die Ergebnisse der Vorbetrachtungen liefern die Entscheidung, welche Boxen getestet werden. Ausschlaggebendes Kriterium sind hier die in der Simulation erreichten Beschleunigungswerte. Nach der Fertigung der Boxen werden diese auf einem Fallturm getestet. Die Crashboxeinheit ist mit einer zusätzlich angebrachten Masse von $m_{\text{Zusatz}}=300\text{kg}$ zu versehen, da dies das Gesamtgewicht des Rennwagen simuliert⁷. Entsprechend der Vorgabe des Regelwerks, muss die Geschwindigkeit

⁷ Entsprechend Regelwerk B3.21.1 – Siehe Anhang X

im Moment des Aufpralls $v=7\text{m/s}$ betragen.⁸ Die Auswertung des Falltest findet über die Berechnung der Beschleunigungswerte anhand des Krafteintrages/Zeiteinheit (F/T) statt. Es können auch direkt die Beschleunigungswerte gemessen werden, was abhängig von der jeweiligen Messeinrichtung ist. Alternativ zu einem Fallturm kann der Test auf einer Crashbahn durchgeführt werden.

2.7 Grundlegendes zur Auswertung der Crashtests

Nach dem Test werden die Beschleunigungswerte ermittelt. Die Spitzenbeschleunigungswerte $a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}$ werden direkt aus dem Diagramm bzw. den Aufzeichnungen abgelesen. Ein Filter für Frequenzen über $f=100\text{Hz}$ ist zulässig.⁹ Mit Hilfe des Filters werden störende Frequenzen, die das Messergebnis negativ beeinflussen oder verfälschen, herausgefiltert. Störeinflüsse können z.B. durch das Schwingen der Prallfläche vom Fallturm entstehen. Die mittlere Beschleunigung $a_{\text{Mittelwert}}$ ist aus den aufgezeichneten Daten zu berechnen. Dies wird mittels Tabellenkalkulationsprogrammen vorgenommen.

2.8 Grundlegendes zur Entscheidungsfindung einer geeigneten Crashboxvariante

Um eine Entscheidung zu treffen, welche Box geeignet ist, werden Kriterien wie Masse, Kosteneffizienz, Herstellbarkeit, Simulationsaufwand, Simulationswerte, Testwerte und die Verfügbarkeit der Materialien betrachtet. Tabelle 1 im Punkt 2.4.6 auf Seite 9 zeigt die Vorauswahl der Materialien. In den folgenden Kapiteln werden Kriterien wie Masse, Simulationsergebnisse und Ergebnisse des Crashtest zur Findung der zu favorisierenden Variante betrachtet.

⁸ Entsprechend Regelwerk B3.21.1 – Siehe Anhang X

⁹ Entsprechend Regelwerk B3.21.2 - Siehe Anhang XI

2.9 Bauform Quader

Grundlage für die Erstellung der ersten Modelle waren die Vorgaben des FSG-Regelwerks. Es handelt sich um Quader mit den Abmessungen Länge, Breite, Höhe ($l=200\text{mm}$, $b=200\text{mm}$, $h=100\text{mm}$).

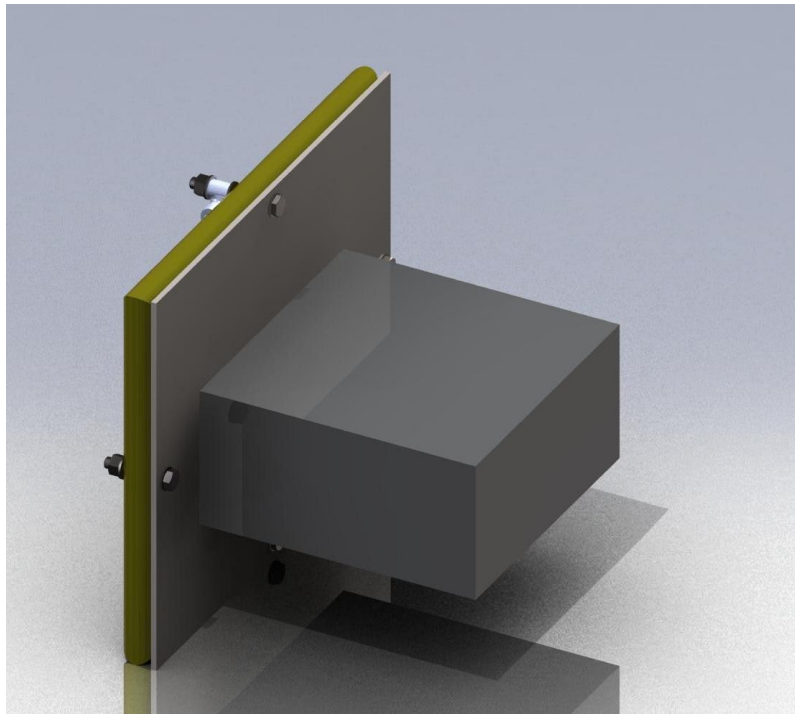


Abbildung 9: Crashboxeinheit in Bauform Quader- CAD-Modell

2.9.1 Crashboxen aus Aluminiumblech

Begonnen wurde mit der Simulation von Aluminium-Boxen, da hier erwartungsgemäß die leichtesten Crashboxen entstehen. Da die AI-Platte aus Aluminiumblech laut Regelwerk eine Materialstärke von $t=4,0\text{mm}^{10}$ aufweisen muss, wurde das erste Modell wegen der Schweißbarkeit mit einer Materialstärke von $t=2,0\text{mm}$ ausgelegt. Weitere Modelle wurden dann in der jeweils nächsten lieferbaren Materialstärke simuliert. Allerdings ist es auf Grund der Schweißbarkeit nicht sinnvoll, Modelle mit weniger als $t=1,5\text{mm}$ Materialstärke zu nutzen, da diese kaum mit der AI-Platte verschweißt werden können. Der Wärmeeintrag im Blech der Crashbox wäre zu groß wodurch das Material zu stark schmilzt und Löcher entstehen, während der Wärmeeintrag im Blech der AI-Platte nicht ausreicht das Material aufzuschmelzen.

¹⁰ Entsprechend Regelwerk 3.20.4 -Siehe Anhang X

2.9.2 Crashboxen aus Stahlblech

Nach der Simulation der Boxen aus Aluminiumblech, wurden Modelle aus Stahlblech simuliert. Da die AI-Platte aus Stahlblech eine Dicke von $t=1,5\text{mm}$ vorgeschrieben ist¹¹, wurde aufgrund der Schweißbarkeit begonnen eine Crashbox mit einer Materialstärke von $t=1,5\text{mm}$ zu simulieren. Gleiche Dicken lassen sich besonders gut miteinander verschweißen, da der Wärmeeintrag bei beiden Teilen gleichmäßig ist. Weitere Modelle wurden in der jeweils nächsten verfügbaren Materialstärke simuliert.

2.9.3 Vorteile der Bauform Quader

Durch die geringe Baugröße ist es möglich bei dieser Bauform leichte Boxen zu fertigen. Das Gewicht einer Box aus Stahl inklusive AI-Platte beträgt bei einer Materialstärke von $t=1,25\text{mm}$ $m=1,821\text{kg}$ und bei einer Box mit $t=1,0\text{mm}$ Materialstärke $m=1,59\text{kg}$ inklusive AI-Platte. Die Herstellung der Form ist unkompliziert, da dies durch Zurichten auf einer Schlagschere und biegen auf einer Abkantbank geschieht.

2.9.4 Nachteile der Bauform Quader

Die Bauform wirkt sich nachteilig beim Verschweißen mit der AI-Platte aus. Während des Verschweißen der Box mit der AI-Platte, verzieht sich die AI-Platte aufgrund der großen Fläche und es entstehen somit schwer schließbare Spalte. In Abbildung 10 und 11 ist ein entstandener Spalt zu erkennen.

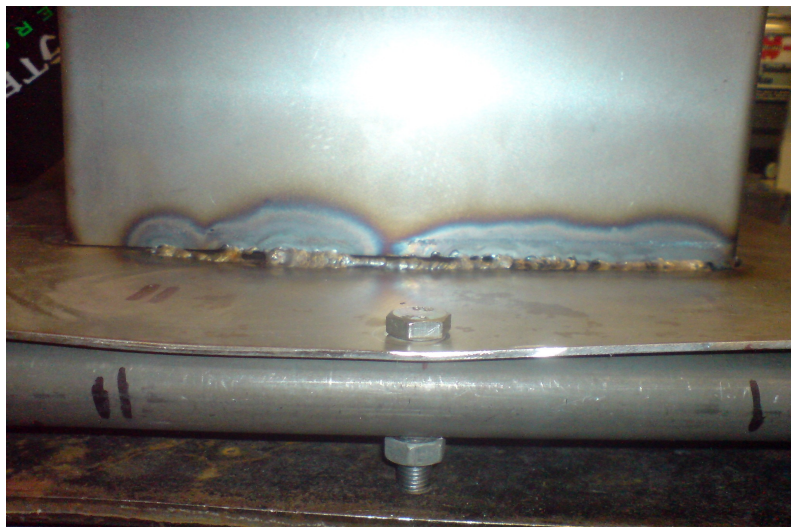


Abbildung 10: Entstandener Spalt nach dem Schweißen

Quelle: eigene Fotografie

¹¹ Entsprechend Regelwerk 3.20.4 -Siehe Anhang X



Abbildung 11: Entstandener Spalt nach dem Schweißen. (Vergrößerte Darstellung)

Quelle: Eigene Fotografie

Weiterhin ergeben sich Nachteile bei den Crashtests, welche im Kapitel 5 - Experimentelle Untersuchung betrachtet werden. Aufgrund der großen Fläche der AI-Platte verformt diese sich zu erst beim Crash. Die Box faltet sich im Bereich zwischen Bulkhead und Platte zusammen, sodass das Bulkhead beim Crash auf die Testplatte trifft, resultierend aus der hohen Steifigkeit der Rohre entstehen Spitzenbeschleunigungswerte die weit über der Vorgabe des Regelwerks liegen.

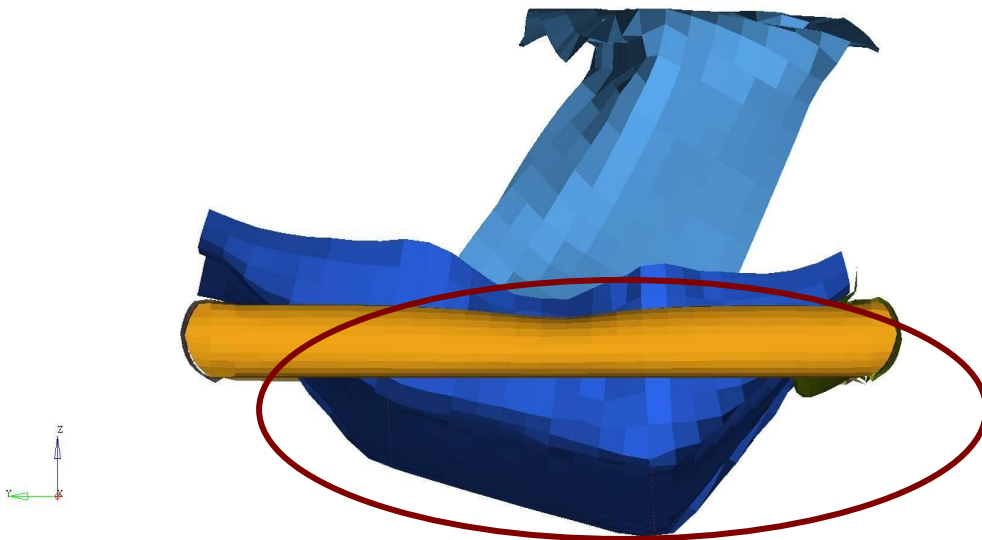


Abbildung12: Seitenansicht der simulierten Crashbox

Abbildung 12 zeigt die Crashboxeinheit $T=15$ ms nach dem Aufprall auf die Crashplatte. Deutlich zu erkennen ist, dass die AI-Platte stark verformt wird. In Abbildung 13 ist anhand der Spannungen deutlich zu erkennen, dass die AI-Platte zu Beginn der Deformation die größten Belastungen erfährt, weshalb ein Nachgeben die Folge ist.

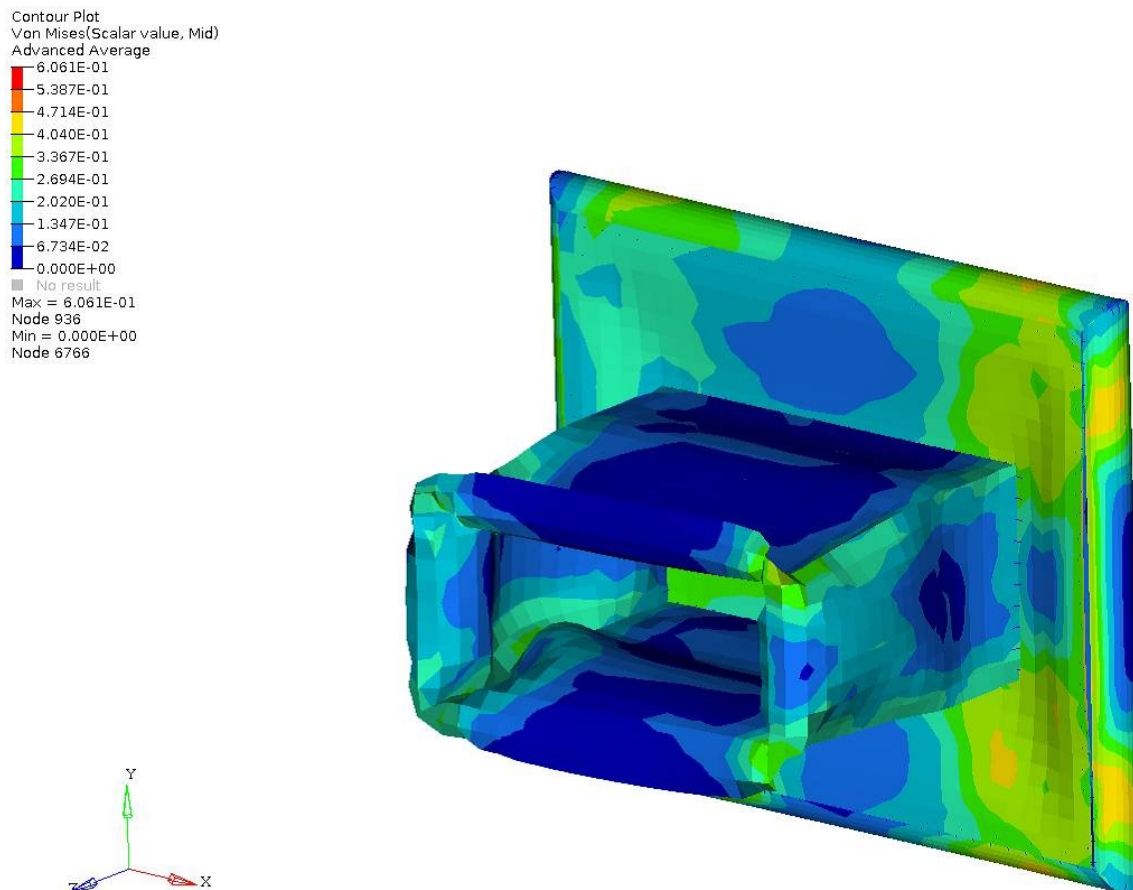


Abbildung 13: Spannungen in Baugruppe zum Zeitpunkt $T=15$ ms

2.10 Bauform Pyramidenstumpf

Da es bei der Bauform Quader zu starken Verformungen der AI-Platte kam, wurde eine Form entwickelt die eine definierte Verformung der Box, weniger Verformung der AI-Platte und eine gute Krafteinleitung in den Rahmen gewährleistet. Hier erweist sich die Bauform Pyramidenstumpf als gute Lösung. Die vordere Öffnung hat die Abmessungen Breite $b=200\text{mm}$ und Höhe $h=100\text{mm}$. Damit erfüllt sie die Anforderung an die Größe, welche vom Regelwerk der FSAE bzw. Formula Student gegeben ist.

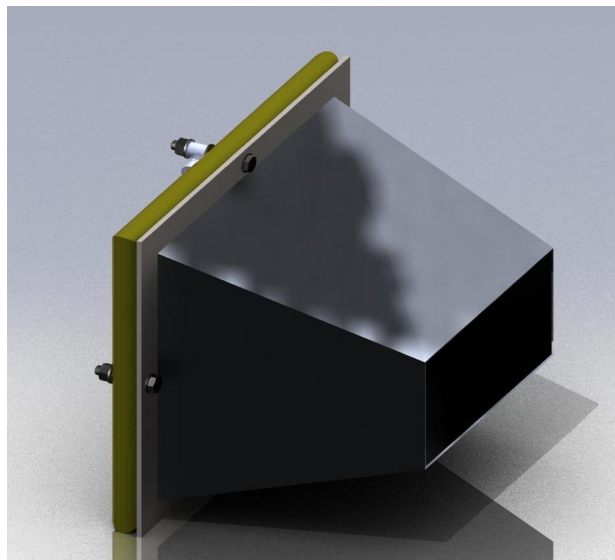


Abbildung 14: Crashboxeinheit in Bauform Pyramidenstumpf- CAD-Modell

2.10.1 Crashboxen aus Aluminiumblech

Aufgrund des erwarteten Gewichtsvorteils wurde die Simulation mit Boxen aus Aluminiumblech begonnen. Es wurden Modelle mit einer Materialstärke von $t=2\text{mm}$ und $t=1,5\text{mm}$ simuliert. Wegen der Schweißbarkeit wurden keine Modelle mit einer Materialstärke kleiner als $t=1,5\text{mm}$ betrachtet. Dies liegt daran, dass ein Verschweißen mit der $t=4\text{mm}$ starken AI-Platte nicht sicher realisiert werden kann.

2.10.2 Crashboxen aus Stahlblech

Für die Simulation der Crashboxen aus Stahlblech wurden Materialstärken von $t=1,5\text{mm}$, $t=1,25\text{mm}$ und $t=1\text{mm}$ gewählt. Dünnere Bleche wurden nicht in Betracht gezogen, da diese nicht sicher mit der $t=1,5\text{mm}$ starken AI-Platte verschweißt werden können. Während das Material der AI-Platte noch nicht aufgeschmolzen ist, ist das Material der Box bereits geschmolzen.

2.10.3 Vorteile gegenüber der Bauform Quader

Ein Vorteil im Vergleich zur Bauform Quader ist die bessere Krafteinleitung in den Rahmen. Auch der Herstellungsprozess ist einfacher als bei der Bauform Quader. Die AI-Platte verformt sich sehr wenig beim Schweißen. Bei der Herstellung kann der Schweißer die zu verschweißenden Bereich gut mit dem Brenner erreichen. Dadurch ergeben sich gleichmäßige Schweißnähte, die für die korrekte Funktion wichtig sind. Eine fehlerhafte Naht kann dazu führen, dass die Box ungleichmäßig gefalten wird.

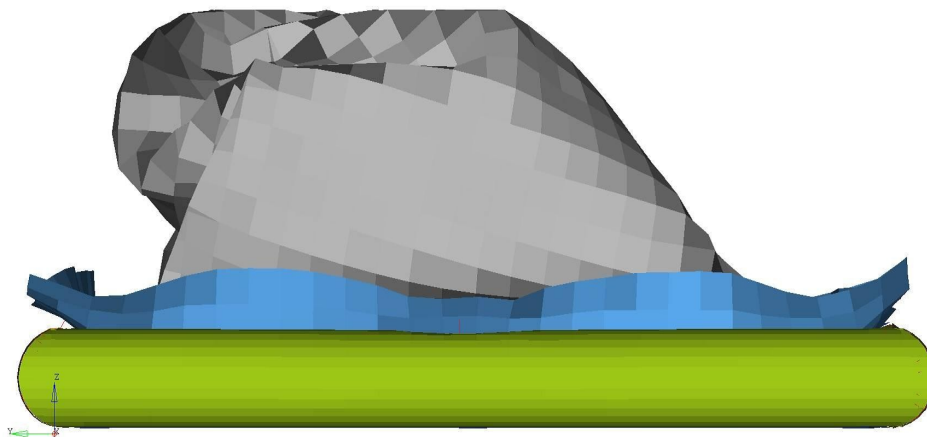


Abbildung 15: Seitenansicht der simulierten Crashbox in der Bauform Pyramidenstumpf

Anhand der Abbildung 15 ist zu erkennen, dass die AI-Platte bei dieser Bauform weniger als bei der Bauform Quader verformt wird und nicht in den Fahrerraum eindringt. Dies wird durch die durchgeführten Crashtests bestätigt und im Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchung gezeigt. Somit ist ein größerer Fahrerschutz gewährleistet.

2.10.4 Nachteile gegenüber der Bauform Quader

Ein Nachteil ist das höhere Gewicht gegenüber der Bauform Quader. Eine Crashbox aus $t=2\text{mm}$ starkem Aluminiumblech (AlMg3) wiegt $m=1,965\text{kg}$ und eine Crashbox aus $t=1,25\text{ mm}$ starkem Stahlblech (S235JR) $m=2,293\text{kg}$. Die Aluminiumbox in der Bauform Pyramidenstumpf ist $m=0,665\text{kg}$ schwerer als die Crashbox in Bauform Quader ($m=1,3\text{kg}$) und die Stahlbox in Bauform Pyramidenstumpf ist $m=0,472\text{kg}$ schwerer als die Stahlbox in Bauform Quader ($m=1,821\text{kg}$). Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die Crashboxen in Bauform Quader, um die Vorgaben des Regelwerkes bezüglich Eindringen in den Fußraum zu erfüllen, mit einer zusätzlichen Strebe im Bulkhead abgestützt werden müssten. Somit ist ein Gewichtsvorteil nicht mehr gegeben.

3. Simulation- Anwendung und Beschreibung der Software

3.1 Software

Zur Auslegung und Simulation der Crashboxen wurde die Software Altair® Hyperworks® genutzt. Es handelt sich dabei um ein Softwarepaket, welches die für eine Crashesimulation benötigten Programme Hypermesh®, Hypercrash®, Hyperview® und Hypergraph® beinhaltet. Diese bietet aufgrund der guten Menüführung auch Anfängern die Möglichkeit FEM- und Crash -Simulationen zu erstellen. Eine Simulation kann nur ein Abbild der Wirklichkeit sein. Die Komplexität einer FEM-Analyse bedingt, dass Modelle vereinfacht werden. Es ist daher beim Reduzieren der Baugruppen zu beachten, dass die Ergebnisse nicht zu stark verfälscht werden. So kann beispielsweise eine fehlerhaft gesetzte Befestigung zu Abweichungen im Bereich von $a=10$ bis $a=15$ g führen und somit die Vorauswahl der zu testenden Box negativ beeinflussen. Der Vorteil einer Simulation ist der Zeitgewinn, da weniger reale Tests durchgeführt werden müssen. Durch die Simulation ist eine Vorauswahl der Crashboxen möglich. Boxen deren Ergebnisse weit über einer festgelegten Grenze liegen, kommen für eine weitere Betrachtung nicht in Frage. Generell ist zu beachten, dass Ergebnisse einer Simulation durch einen real stattfindenden Test verifiziert werden müssen.

3.2 CAD-Software

Die Modelle werden mittels der CAD- Software SolidWorks® als Bauteil erstellt und später zur Kontrolle als Baugruppe zusammengeführt. Die Baugruppe wird für das Gesamtmodell des Rennauto benötigt. Die einzelnen Teile werden zusätzlich in einem Austauschformat, in diesem Fall .iges gespeichert, damit sie für die Simulation weiterverarbeitet werden können. Die Modelle der Crashboxeinheit können in jedem beliebigen CAD-Programm erstellt werden.

3.3 Altair® Hypermesh®

In Abbildung 16 ist rot markiert der Menüpunkt zu erkennen, wo das Modell zur weiteren Bearbeitung ausgewählt wird. Nachdem das Modell geladen wurde, muss im grün markierten Bereich 2D ausgewählt sein, um eine automatische Flächenvernetzung zu erreichen.

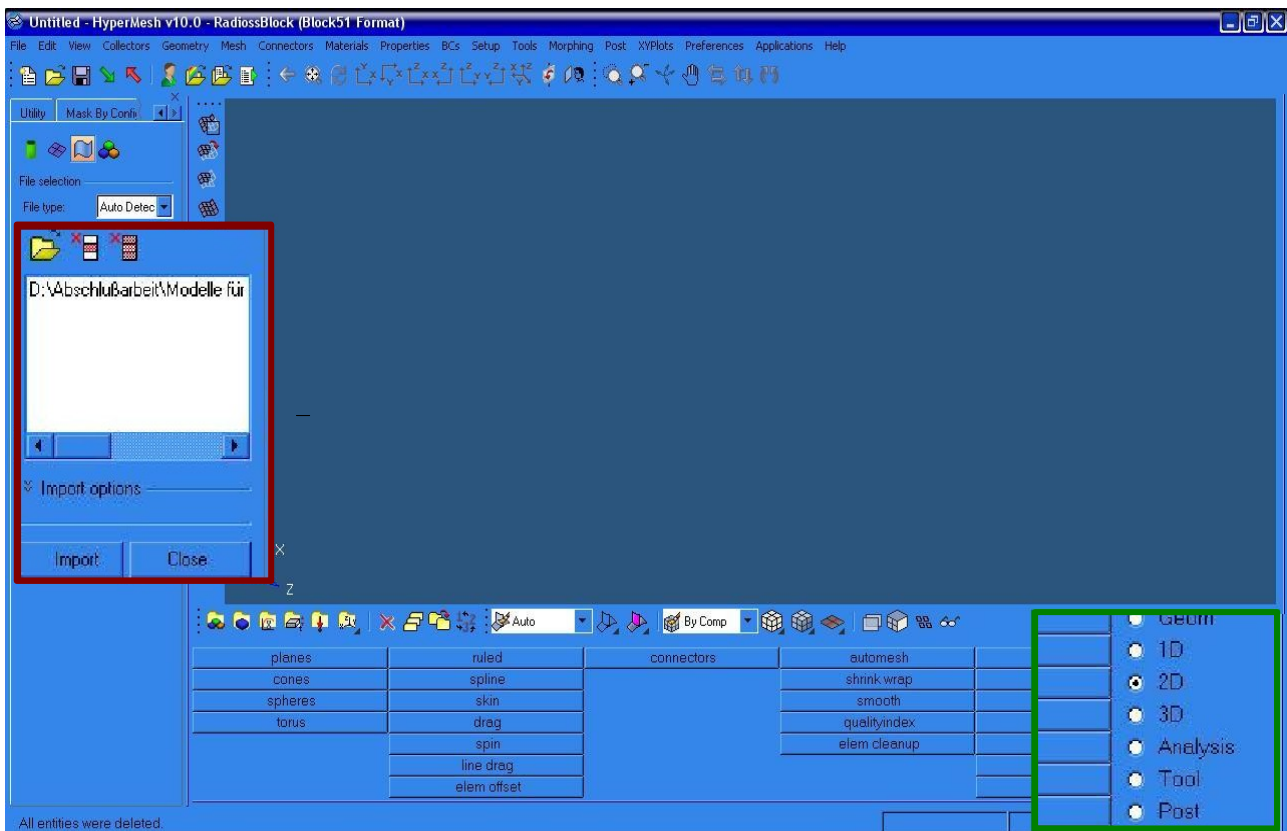


Abbildung 16: Bildschirmansicht Altair® Hypercrash®

3.3.1 Vernetzen

Die Vernetzung wird mit der Software Altair® Hypermesh® durchgeführt. Nach dem Laden des Modells ist die Kontur zu erkennen. Unter dem Menüpunkt *Automesh* wird die Vernetzung des Modells vorgenommen. Die zu vernetzenden Flächen werden mit dem Mauszeiger des PC ausgewählt. Dies bietet den Vorteil, dass Flächenelemente vernachlässigt oder hinzugefügt werden können. Beispielsweise kann gewählt werden, ob die Box eine geschlossene oder eine offene Kontur aufweisen soll. Alternativ können auch über ein Menü mehrere Teile bzw. das ganze Bauteil zum vernetzen gewählt werden. Dies erlaubt eine größere Flexibilität in der Anwendung und eine schnellere Simulation verschiedener Varianten.

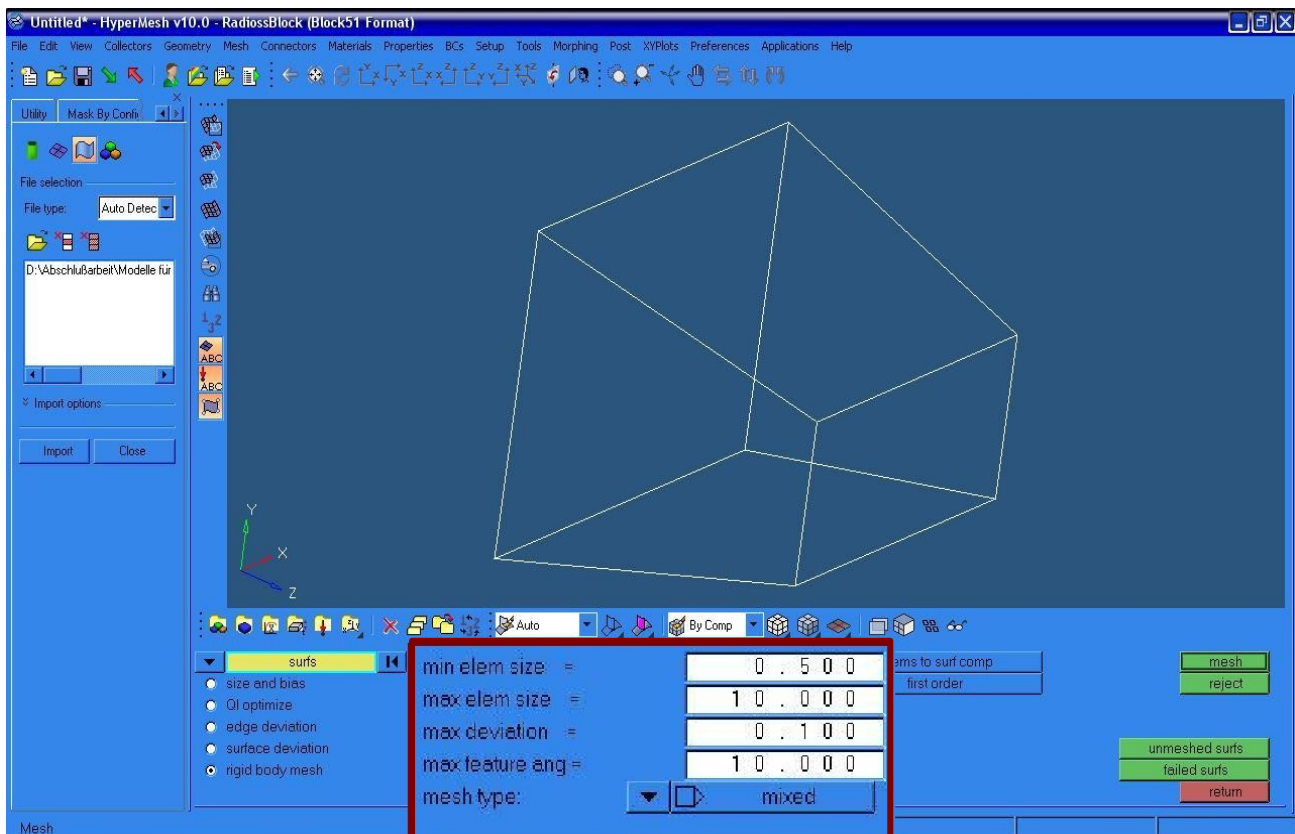


Abbildung 17: Menüansicht Vernetzen

In Abbildung 17 ist in der roten Markierung der Bereich zum Festlegen der Elementgrößen zu erkennen. Als minimale Elementgröße wurde 0,5mm gewählt. Die maximale Elementgröße wurde mit 10mm festgelegt. Als Flächenelemente stehen Rechtecke und Dreiecke zur Auswahl. Generell ist festzustellen, dass Rechtecke für eine Simulation Dreiecken gegenüber vorgezogen werden sollten. Die bei dreieckigen Elementen eventuell auftretenden Spannungsspitzen können das Ergebnis verfälschen. Bei der Bauform Pyramidenstumpf lässt sich dies nicht verhindern, aber durch die Wahl der richtigen Elementgröße minimieren. Sind Elemente zu groß gewählt, wird das Ergebnis ungenau. Es ergeben sich falsche Werte und das Verformungsbild stimmt mit der Realität nicht überein. Vorteil ist der geringe Rechenaufwand. Werden die Elemente sehr klein gewählt, wird der Rechenaufwand groß, das Schadensbild jedoch genauer.

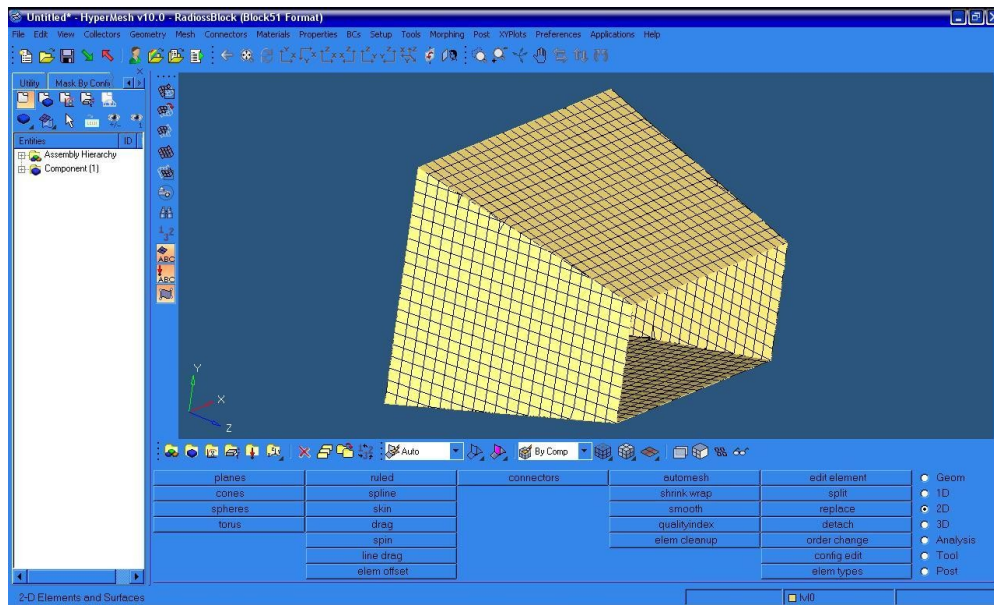


Abbildung 18: Fertig vernetztes Modell

Abbildung 18 zeigt das Modell nachdem es vernetzt wurde. Gelb dargestellt sind die vernetzten Flächenelemente. Diese werden im weiteren benutzt um die Materialparameter einzustellen. Nachdem das Modell vollständig vernetzt ist, wird es im für die weite Verarbeitung nötigen Dateiformat .rad exportiert.

3.4 Altair® Hypercrash®



Abbildung 19: Startbildschirm Altair® Hypercrash®

Die weitere Bearbeitung des Modells wird mit Altair® Hypercrash® vorgenommen. Es ist darauf zu achten, dass der korrekte Solver gewählt wird. In diesem Fall RADIOSS® in der Version 10. Alternativ können Modelle berechnet werden, die mit anderen Crashsimulations-Programmen z.B LS-Dyna® oder Pam crash® erstellt wurden. Als Solver wird das Programm zum Berechnen der einzelnen Iterationsschritte der Simulation bezeichnet. Eine Auswahl des falschen Solvers führt zu einer unbrauchbaren Simulation. In der roten Markierung in Abbildung 19 wird der zu verwendende Solver gewählt.

3.4.1 Materialeigenschaften des simulierten Modells

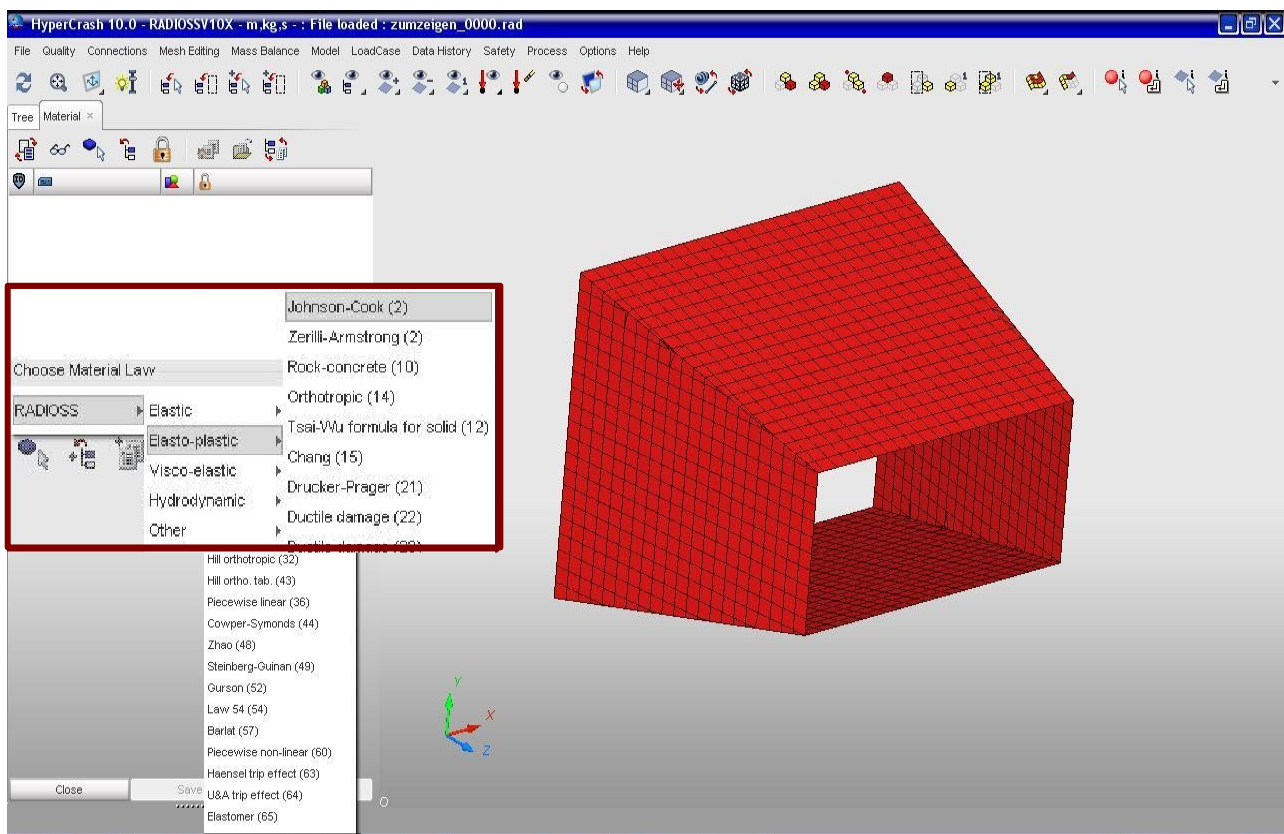


Abbildung 20: Auswahl Materialmodell, Elastoplastisch nach Johnson & Cook

Material

In Abbildung 20 ist das Modell nach dem Laden zu erkennen. Es handelt sich hierbei um ein Oberflächenmodell. Etwaige Parameter wie die Dicke werden nicht dargestellt. Als nächster Schritt wird das Material der Crashbox festgelegt. Das gewählte Materialmodell ist elastoplastisch nach Johnson & Cook. Entgegen anderer Materialmodelle werden bei Johnson & Cook allgemeine Materialeigenschaften zur Simulation genutzt. Abbildung 21 zeigt das Eingabefenster für die

benötigten Werte.

1. Materialbezeichnung
2. Dichte
3. E-Modul
4. Querkontraktionszahl
5. Fließgrenze
6. Verfestigung
7. Verfestigungsfaktor
8. Bruchdehnung
9. Maximalspannung
10. Dehngrenze
11. Oberflächenfaktor
12. Temperaturexponent
13. Schmelztemperatur

Property	Value
Title	S235JR
Initial density	7,86e-6
Reference density	0
Young modulus	210
Poisson ratio	0,3
Yield stress	0,3
Hardening param.	0,3
Hardening exponent	0,5
Failure plastic strain	0,5
Maximum stress	0
Strain rate coeff	0
Reference strain rate	0
Strain rate Smoothing	<input type="checkbox"/>
Cutoff frequency for smoothing	0
Temperature exponent	0
Melting temperature	0

Abbildung 21: Eingabefenster der Materialkennwerte

Für die Simulation sind nicht alle Werte nötig. Um eine realistische Simulation durchzuführen, reichen die Werte von 1. bis 6.

Weitere Materialeigenschaften

Nachdem das Material festgelegt wurde, werden weitere Eigenschaften unter dem Menüpunkt „Property“ festgelegt. Es wird hierbei unterschieden, ob es sich um einen Volumenkörper, ein Schalenmodell inkl. Materialstärke oder ein Bauteil in Sandwich-Bauweise handelt. Die zu simulierenden Boxen werden als Schalenmodelle abgebildet. Wichtig ist hierbei, dass festgelegt wird, ob die Materialdicke konstant bleibt oder als veränderlich angenommen wird. Dies ist entsprechend der Materialeigenschaften festzulegen. Da die Crashboxen aus sich faltenden Aluminium- bzw. Stahlblechen bestehen, wird die Materialdicke als konstant angenommen.

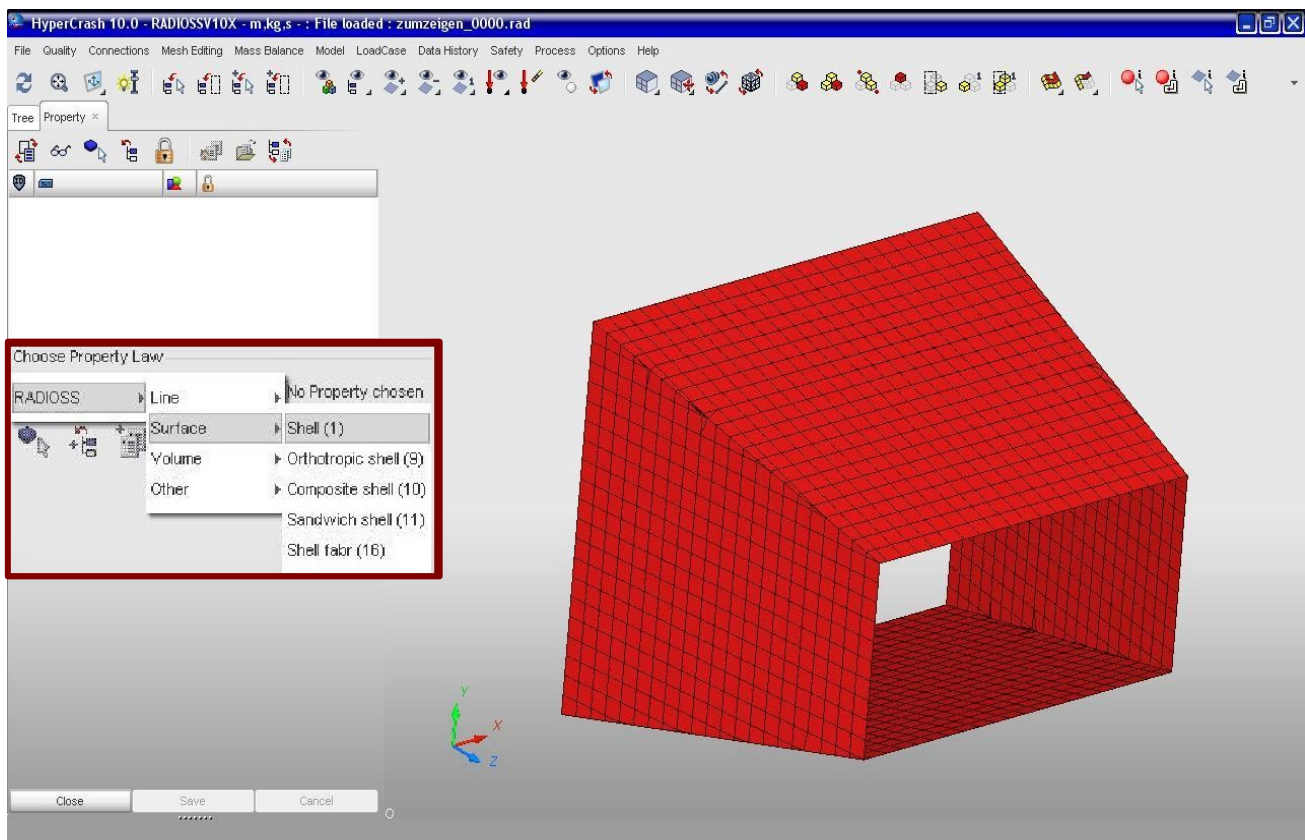


Abbildung 22: Auswahlbildschirm Properties- gewählt Shellelement

Die rote Markierung in Abbildung 22 zeigt die Menüansicht, die zum Auswählen der Eigenschaften dient.

3.4.2 Lastfall

Gegenlager

Wichtig für die Simulation ist der Menüpunkt „Rigid Body“, dort werden das Gegenlager bzw. die Befestigungspunkte für die Crashbox festgelegt. In Abbildung 23 ist das Gegenlager anhand der orangefarbenen Netzlinien (rot markiert) zu erkennen. Es ist auch möglich nur einige wenige Bereiche der Grundfläche auszuwählen und somit die Simulation auf den gegebenen Testfall anzupassen, wie dies beispielsweise bei einer Befestigung mittels Schrauben der Fall wäre.

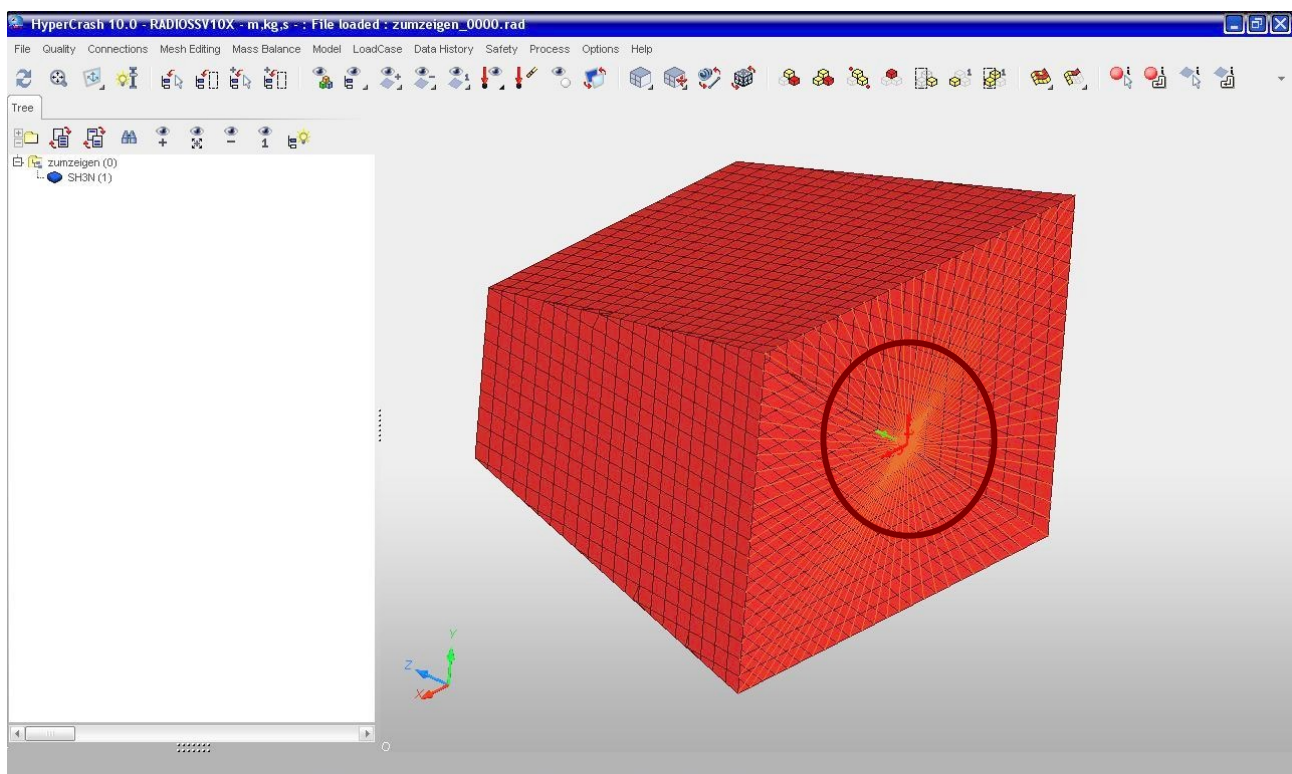


Abbildung 23: Ridged Body & Boundary Conditions

Führung

Im Menüpunkt „Boundary Conditions”(Randbedingungen) werden die Freiheitsgrade begrenzt. In diesem Fall sind die Rotationen um die drei Hauptachsen sowie die Translationen in Y- und X-Richtung gesperrt. Die mögliche Bewegungsrichtung ist die Z-Richtung, was am grünen Pfeil in Abbildung 23 zu erkennen ist. Das Sperren der nicht benötigten Richtungen verhindert unerwünschte Bewegungen, z.B Drehungen im Aufprallmoment oder Bewegungen in seitlicher Richtung. Die zusätzlich benötigte Masse wird ebenfalls im Mittelpunkt des Ridged Body festgelegt. Entsprechend dem Regelwerk ist eine Masse von $m_{\text{Zusatz}}=300$ kg notwendig.

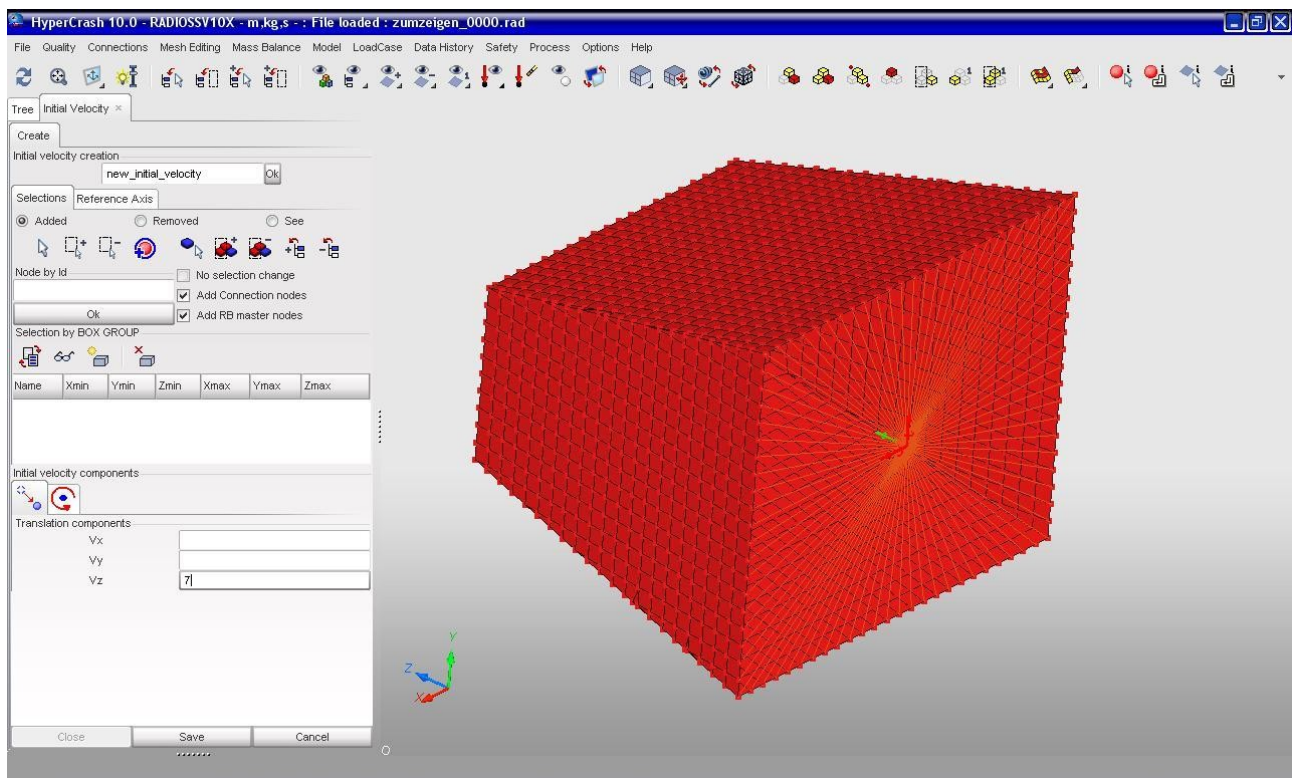
Festlegen der Geschwindigkeit

Abbildung 24: Menüansicht Anfangsgeschwindigkeit mit ausgewählten Knotenpunkten

Die Geschwindigkeit beim Aufprall muss $v=7\text{m/s}$ betragen. Für die Simulation wurde eine konstante Geschwindigkeit von $v=7\text{m/s}$ in Z-Richtung festgelegt. Für die Festlegung der Geschwindigkeit ist es nötig das gesamte Bauteil bzw. die Baugruppe zu markieren, da die Geschwindigkeit auf jeden Knotenpunkt wirken muss. Die markierten Knotenpunkte sind in Abbildung 24 zu erkennen. Wird dies nicht getan, führt das zu verfälschten Simulationsergebnissen. Nachdem die Geschwindigkeit zugewiesen wurde, wird diese durch einen roten Pfeil dargestellt. (siehe Abbildung 25)

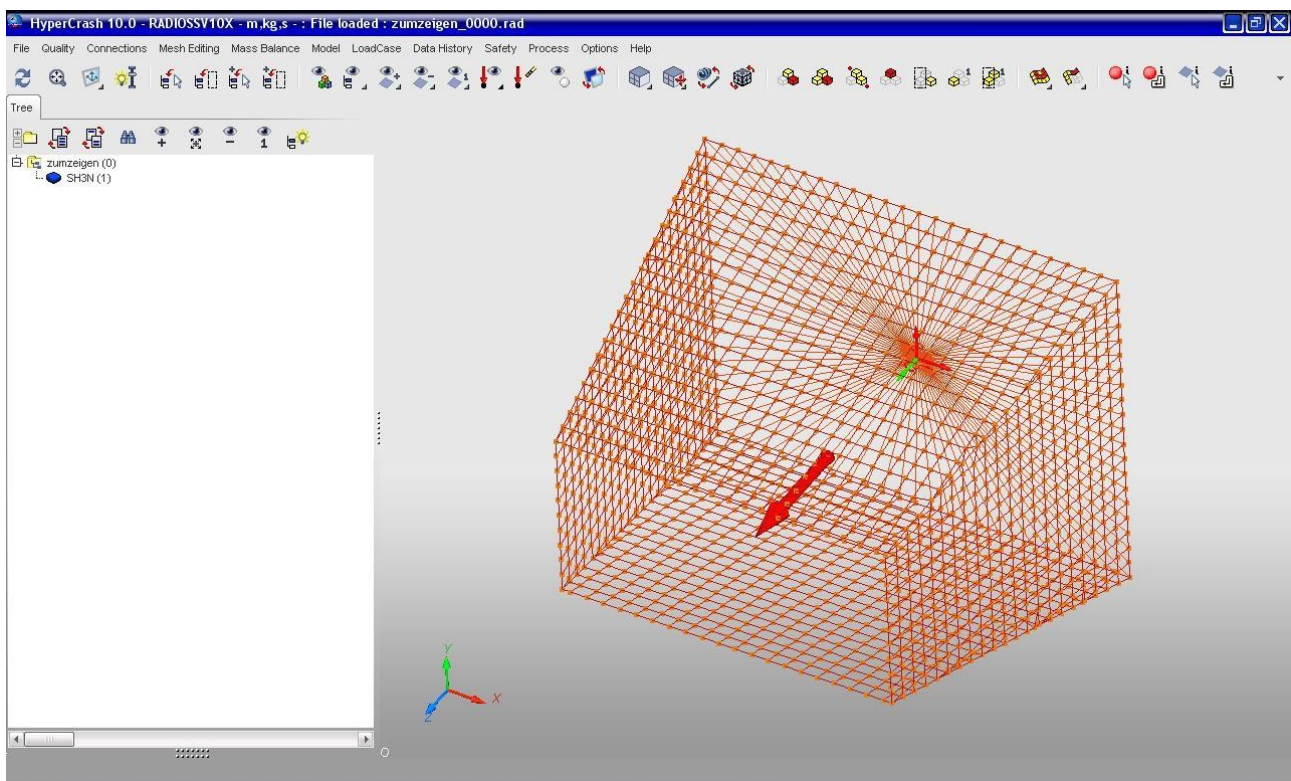


Abbildung 25: Modell mit dargestellter Geschwindigkeit

Durchdringungen

Etwaige Berührungen und Durchdringungen führen zu fehlerhaften Ergebnisse. Durchdringungen können zwischen Bauteilen aber auch Flächenelementen eines Bauteils auftreten und müssen verhindert werden. Im Menü „Contact Interfaces“ (Berührungsflächen) werden die Bauteile ausgewählt, bei denen Durchdringungen unterdrückt werden sollen. Im Falle der Crashboxeinheit sind das alle Einzelteile der Baugruppe.

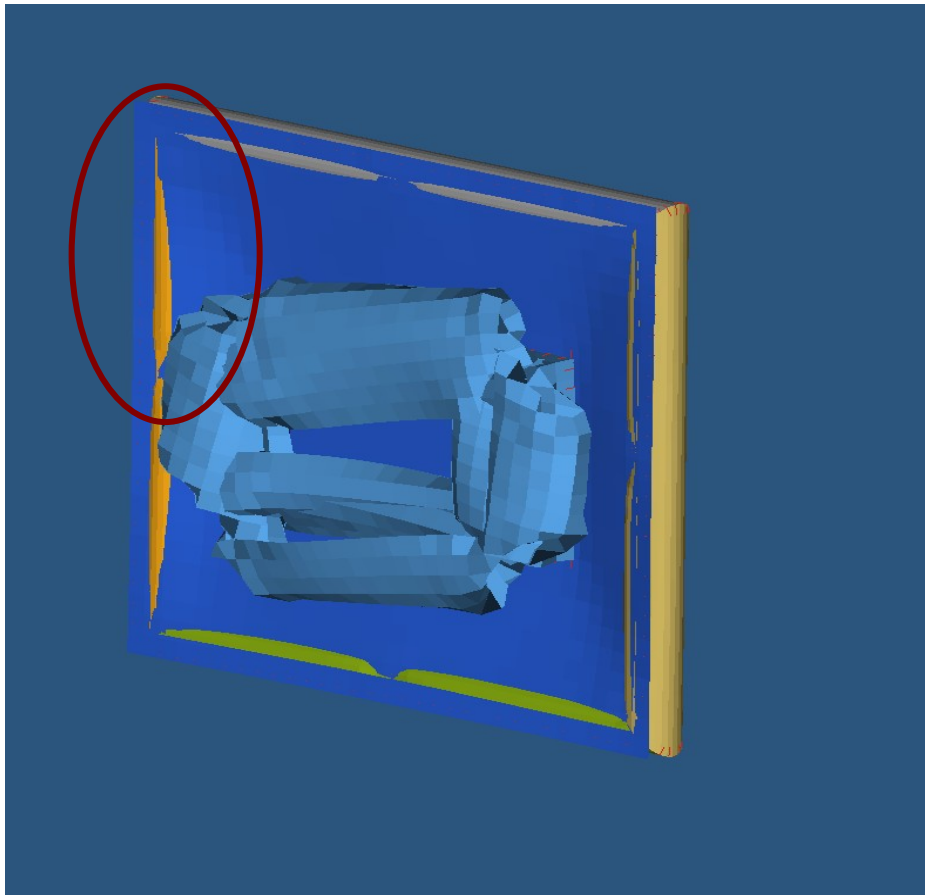


Abbildung 26: Modell mit Durchdringungen

In Abbildung 26 ist eine Durchdringung zwischen Bulkhead und AI-Platte zu erkennen. Durchdringungen führen zu fehlerhaften Ergebnissen, da einige Teile der Baugruppe keinen Widerstand aufweisen und sich so frei im Raum bewegen können.

Prallfläche

Nachdem die Eigenschaften des Modells festgelegt und eingestellt wurden, ist im Menüpunkt „Rigid Wall“ die Prallfläche zu simulieren. Hier wurde ein Parrallelogram mit unendlicher Steifigkeit gewählt. Der eingestellte Abstand zwischen Crashbox und der Prallfläche beträgt 200mm. Somit erreicht man einen geringen Rechenaufwand. Wichtig ist, dass der Bereich, in dem die Knoten für die Simulation gesucht werden, festgelegt wird. Der Bereich beträgt in diesem Fall 200 mm, und ist transparent dargestellt, wie in Abbildung 27 zu erkennen.

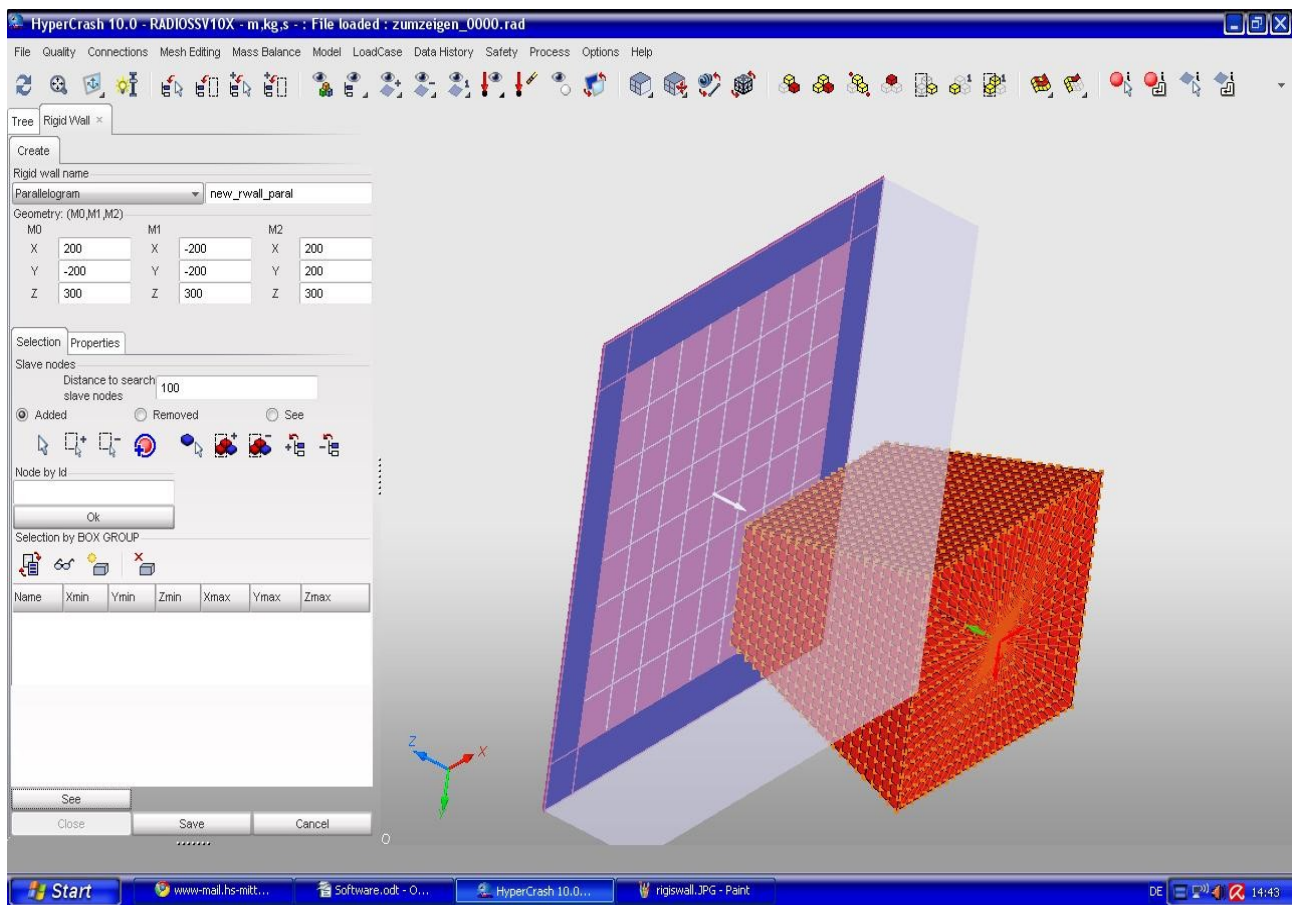


Abbildung 27: Prallfläche mit Erfassungsbereich der Knoten

3.4.3 Beschleunigungsmesser

Damit die Simulation ausgewertet werden kann, ist es nötig Beschleunigungsmesser am Modell anzubringen. Es ist möglich eine beliebige Anzahl festzulegen. Im Fall der Crashboxeinheit wurde je ein Beschleunigungsmesser am Bulkhead und am Gegenlager angebracht, da dies die relevanten Messpunkte sind, an denen die zulässige Beschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}=40g$ nicht überschritten werden darf.

3.4.4 Berechnung und Auswertung der Simulation

Im Anschluss wird das Modell unter zur Hilfenahme des Menüpunkt „Model Checker“ überprüft. Dabei wird sichergestellt, dass das Material stimmt, keine überflüssigen Eigenschaften vorhanden sind. Gleichzeitig werden etwaige Materialdurchdringungen angezeigt.

Abbildung 28 zeigt die komplette Baugruppe mit simulierter AI-Platte und Bulkhead. Blau dargestellt sind die simulierten Schweißnähte. Diese sind nötig, wenn das Modell, wie das real existierende Bauteil, aus mehreren Einzelteilen besteht. Alternativ kann das Modell einteilig sein, allerdings ist dann bei der Simulation darauf zu achten, dass die Ergebnisse nicht verfälscht werden. Dies kann beispielsweise durch ein fehlerhaft gesetztes Gegenlager geschehen. In ersten Simulationen wurde die Crashbox als Bauteil simuliert. Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen einer simulierten Crashbox und einer simulierten Crashboxeinheit. Soll die ganze Baugruppe simuliert werden, so müssen die Einzelteile zuerst geladen werden. Dann werden diese miteinander verbunden. Die Reihenfolge zur Vorbereitung der Simulation ist analog.

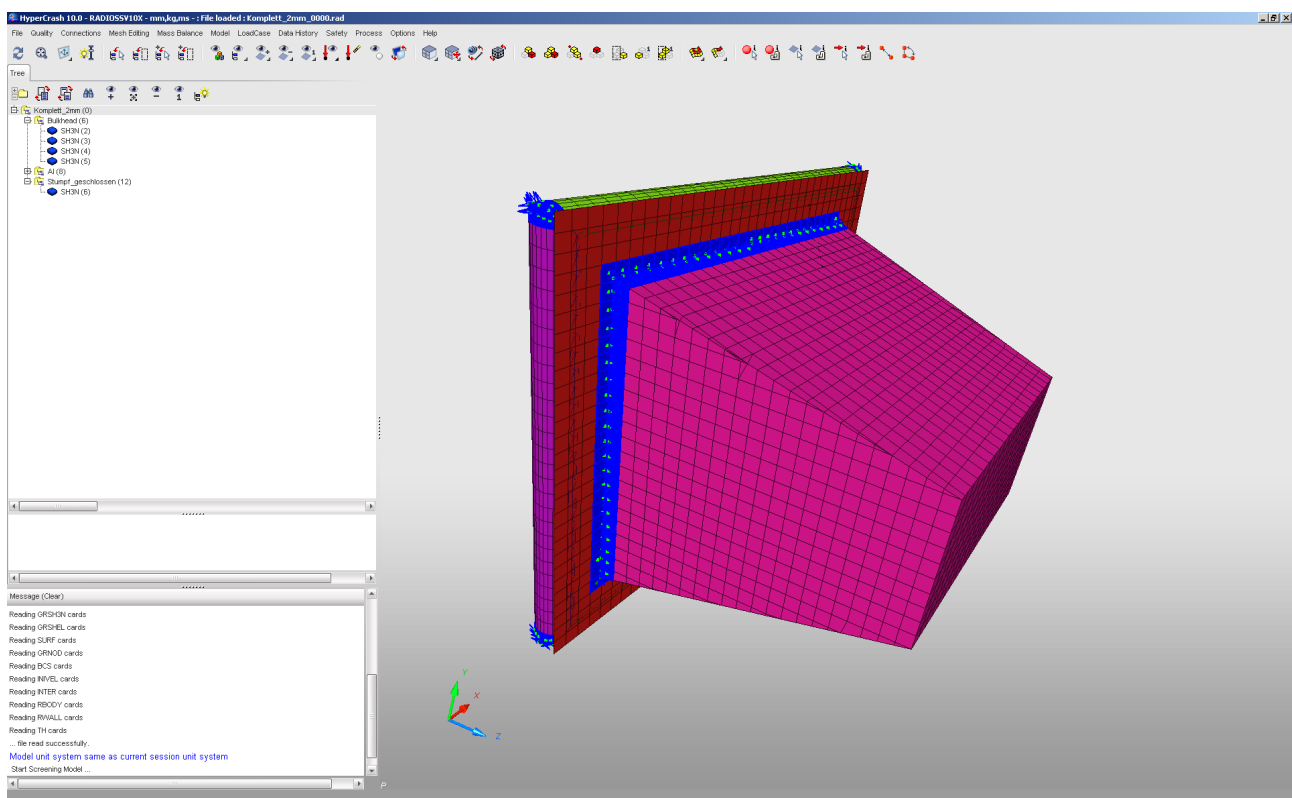


Abbildung 28: Für Simulation vollständig vorbereitetes Modell (Crashboxeinheit)

Nachdem die Simulation vorbereitet ist, wird das Modell im entsprechenden Format .rad exportiert und mittels des Solvers RADIOSS® berechnet. Anschließend werden die Ergebnisse in Altair® Hyperview® und Hypergraph® betrachtet und ausgewertet.

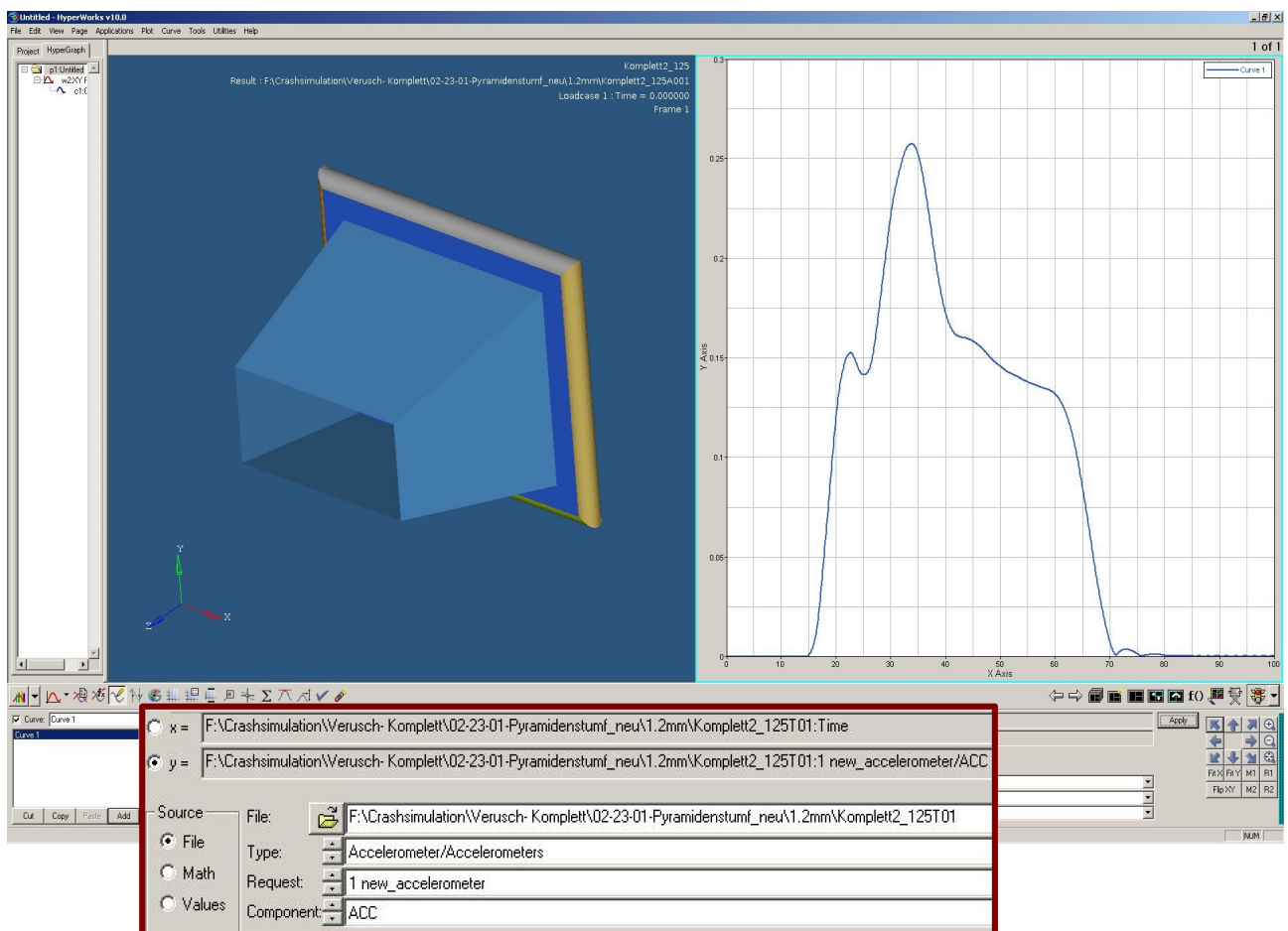
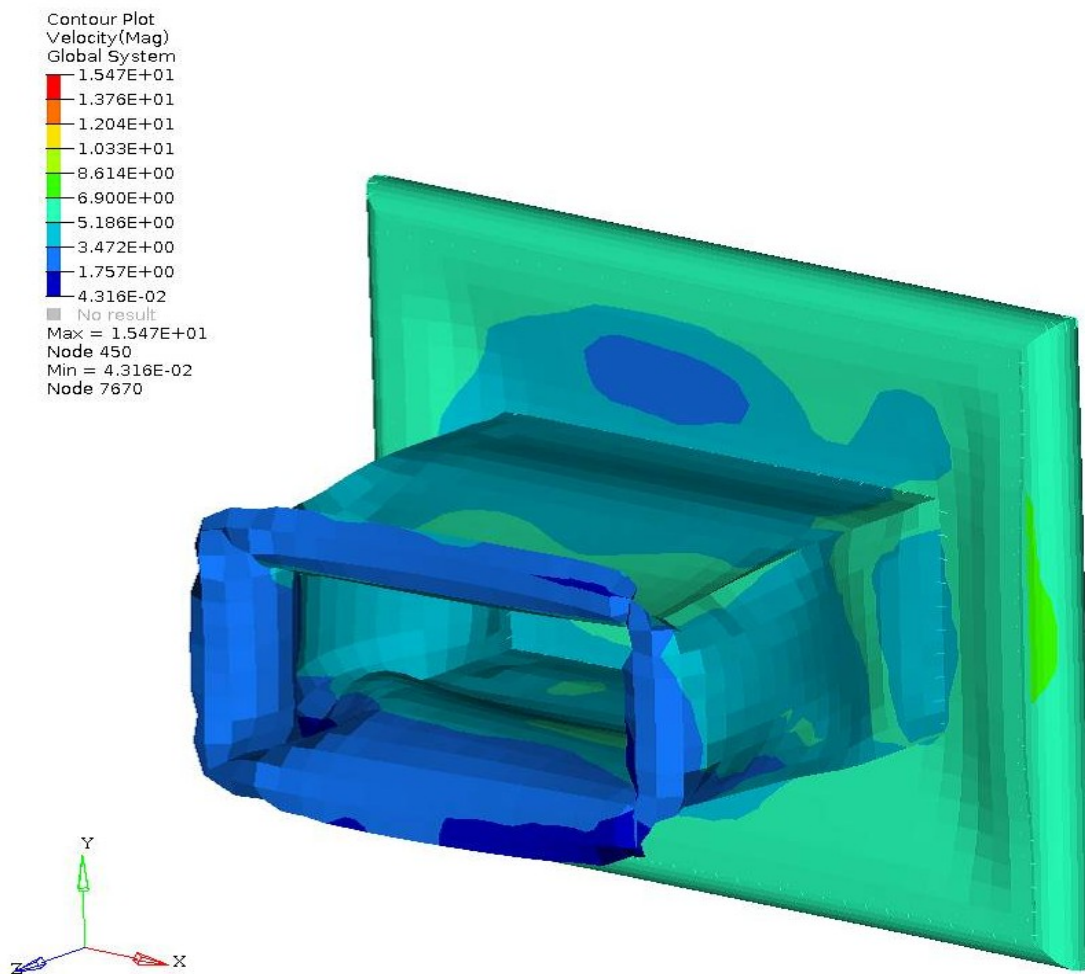


Abbildung 29: Ausgabebildschirm HyperView® und Hypergraph®

In Abbildung 29 ist der Ausgabebildschirm von Hyperview® und Hypergraph® zu sehen. Im linken Fenster wird die Verformung während der Simulation angezeigt. Rechts ist das Diagramm mit den Beschleunigungswerten zu erkennen. Im Rot markierten Bereich kann ausgewählt werden, welche Werte angezeigt werden. Es können Beschleunigungswerte, Geschwindigkeit und entstehende Spannungen betrachtet werden.



*Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung während der Deformation für $T=10\text{ms}$ -
Bauform Quader- Stahlblech $t=1,0\text{ mm}$*

Abbildung 30 zeigt die Verteilung der Geschwindigkeit über der Crashboxeinheit während der Deformation. Hieraus lässt sich der Abbau der Geschwindigkeit zu einem beliebigen Zeitpunkt betrachten, hier $T=10\text{ms}$ nach dem Aufprall. Deutlich zu erkennen ist, dass die Crashbox eine Geschwindigkeit von ca. $v=2\text{m/s}$ (blau) aufweist, während diese bei der AI-Platte und dem Bulkhead noch ca. $v=7\text{m/s}$ (grün) beträgt. Für die Auswertung der Simulation der gezeigten Crashbox sind dies keine relevanten Ergebnisse, dienen aber dem Verständnis, weshalb es im Bereich der AI-Platte zu starken Verformungen kommt.

Die weiteren Auswertungen der Crashboxeinheit werden an Hand der Beschleunigungsdaten vorgenommen. Diese Werte werden beispielsweise zur Ermittlung der Mittelwerte, in Formate wie sie für Tabellenkalkulationen nötig sind, exportiert.

4 Bewertung der Simulationsergebnisse

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse der unterschiedlichen Varianten von Crashboxeinheiten dokumentiert und bewertet. Die Abbildungen zeigen die maximal auftretenden Verformungen laut durchgeführter Simulation. Diese dienen neben der Auswertung der Beschleunigungswerte der Auswahl der im Crashversuch zu testenden Varianten.

4.1 Simulationsergebnisse der Bauform Quader

4.1.1 Bauform Quader -Aluminiumblech – 2,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Aluminium AlMg3
Materialstärke:	t=2 mm
Masse:	m=1,3kg

Ergebnisse der Simulation

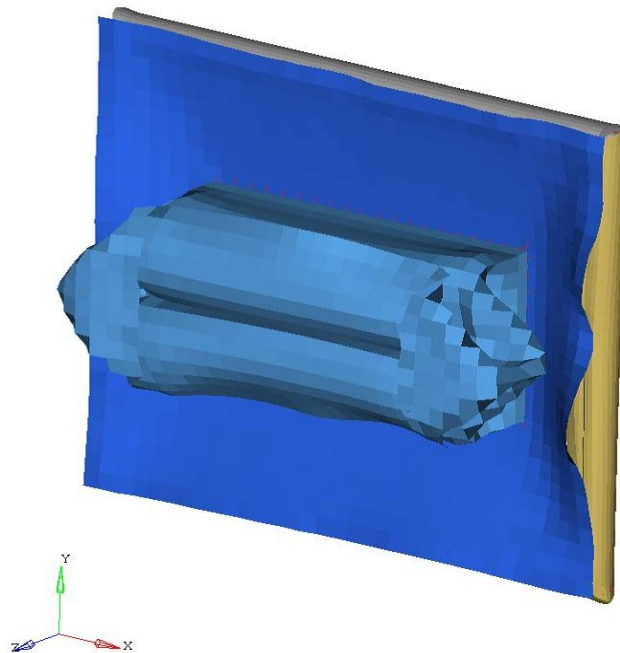


Abbildung 31 : Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,

Bauform Quader, Aluminiumblech AlMg3, t=2,0mm

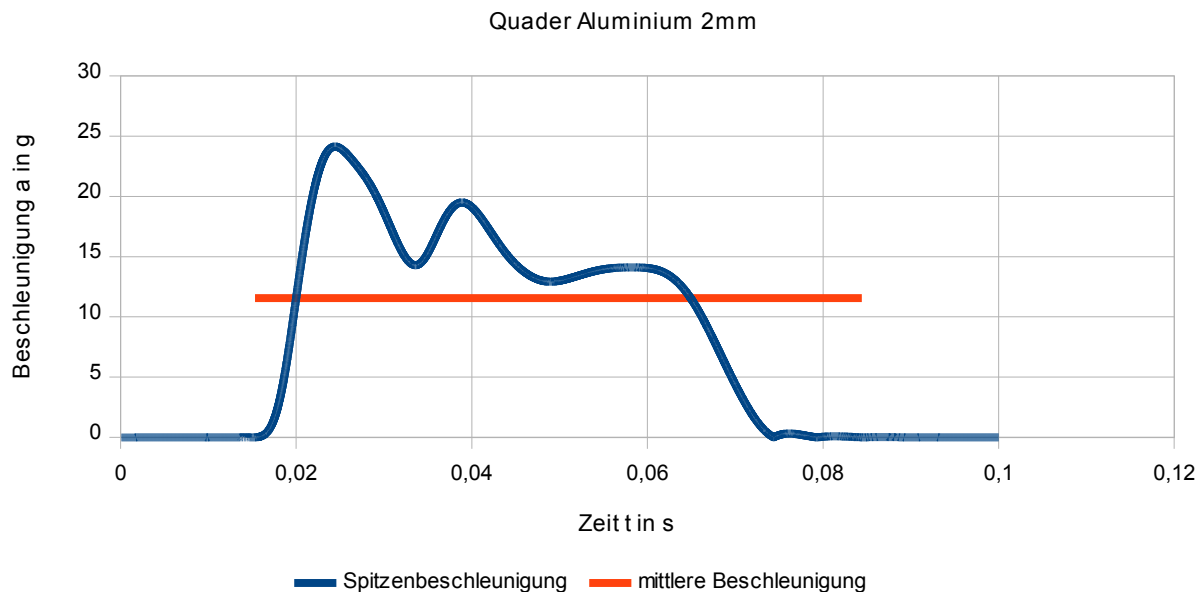


Abbildung 32: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Die Spitzenbeschleunigung beträgt $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 25,12\text{g}$ und liegt damit unter der maximal zulässigen Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$.

Mittlere Beschleunigung

Als mittlere Beschleunigung ergibt sich ein Wert $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 11,55\text{g}$ der ebenfalls unterhalb des geforderten $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20\text{g}$ liegt.

Bewertung der Simulationsergebnisse

Bei dieser Crashboxeinheit ist in Abbildung 31 ersichtlich, dass die AI-Platte aus $t = 4,0\text{mm}$ starkem Aluminium nur wenig verformt wird. Die Box selbst verformt sich sehr gleichmäßig. Dadurch werden die Kräfte gut aufgenommen. Die Ergebnisse der Beschleunigungswerte liegen weit unter den Vorgaben der Regelwerke. Am Graph, Abbildung 32, ist im Bereich zwischen $T = 0,02\text{s}$ und $T = 0,04\text{s}$ zu erkennen, dass zu Beginn der Deformation der größte Teil der Energie abgebaut wird, da hier die höchsten Beschleunigungswerte erreicht werden.

4.1.2 Bauform Quader -Aluminiumblech – 1,5mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Aluminium AlMg3
Materialstärke:	$t=1,5\text{ mm}$
Masse:	$m=1,137\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

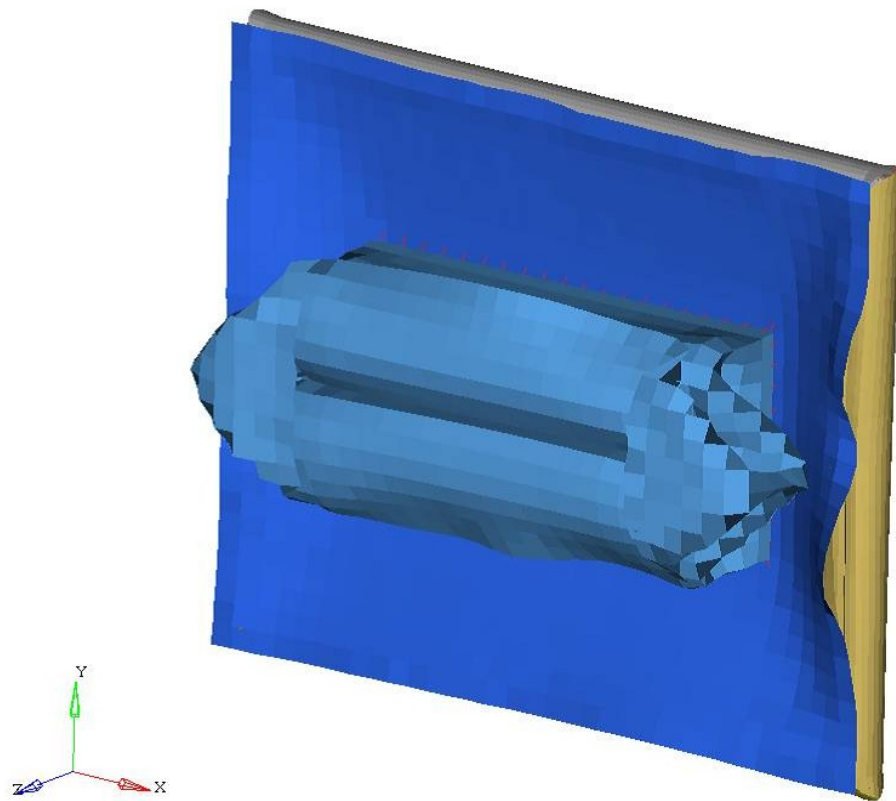


Abbildung 33: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,

Bauform Quader, Aluminiumblech AlMg3, $t=1,5\text{ mm}$

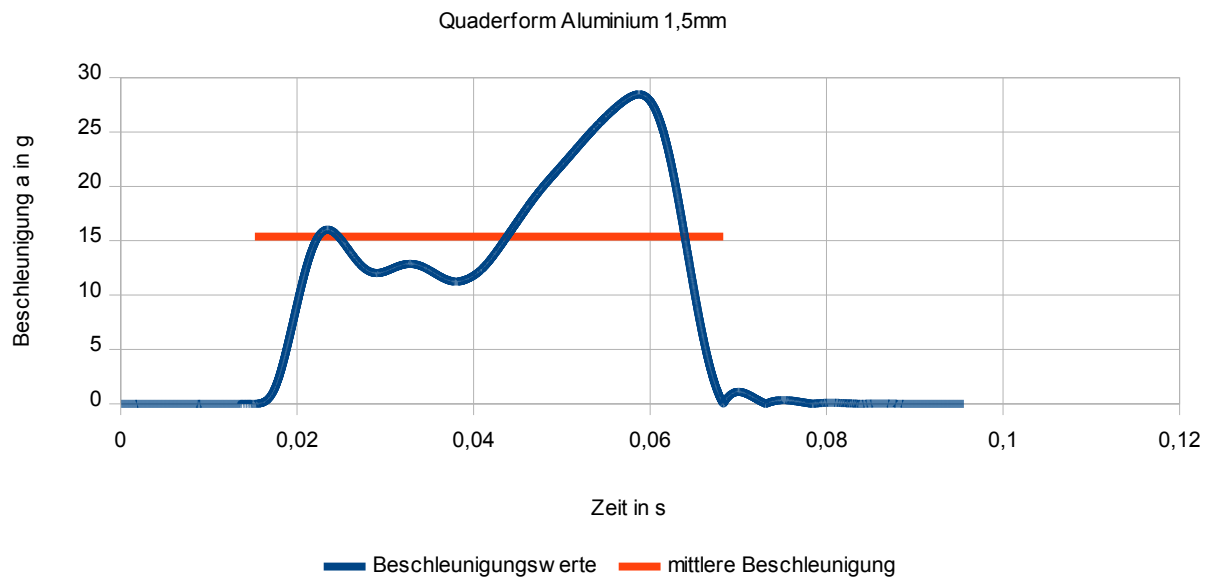


Abbildung 34: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Die Spitzenbeschleunigung beträgt $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 28,46\text{g}$ und liegt damit unter den maximal zulässigen $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 15,37\text{g}$ und liegt damit ebenfalls unterhalb der geforderten $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20\text{g}$.

Bewertung der Simulationsergebnisse

Die untersuchte Crashbox mit einer Materialstärke von $t=1,5\text{mm}$ verformt sich stärker im Vergleich zur Crashbox mit einer Wandstärke $t=2,0\text{mm}$. Die Werte liegen unterhalb der geforderten Vorgaben des Formula Student Regelwerks. Der Graph (Abbildung 34) zeigt, dass die Spitzenbeschleunigungswerte zum Ende der Deformation bei $T=0,06\text{s}$ auftreten.

4.1.3 Bauform Quader -Stahlblech – 2,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Stahl S235 JR
Materialstärke:	$t=2,0\text{ mm}$
Masse:	$m=2,509\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

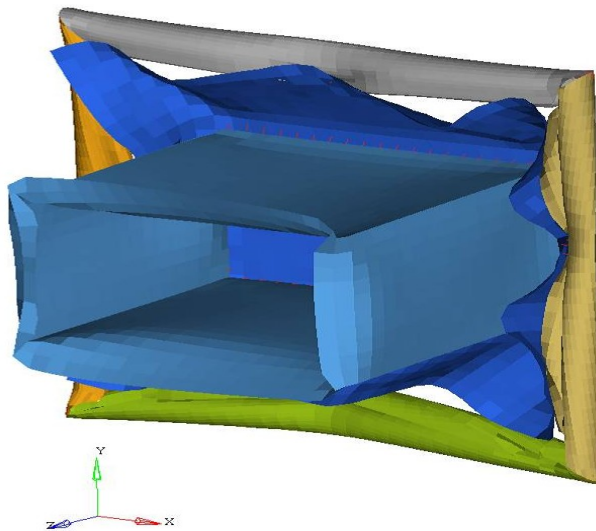


Abbildung 35: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,
Bauform Quader, Stahlblech S 235JR, $t=2,0\text{mm}$

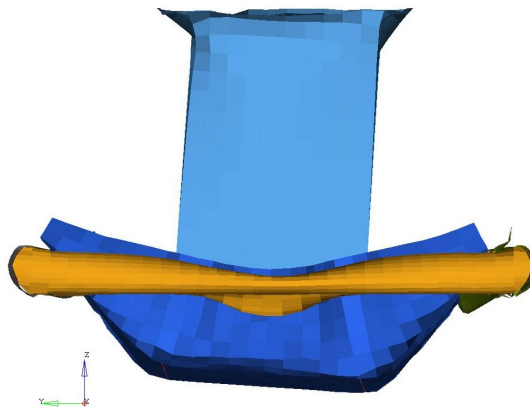


Abbildung 36: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation - Seitenansicht

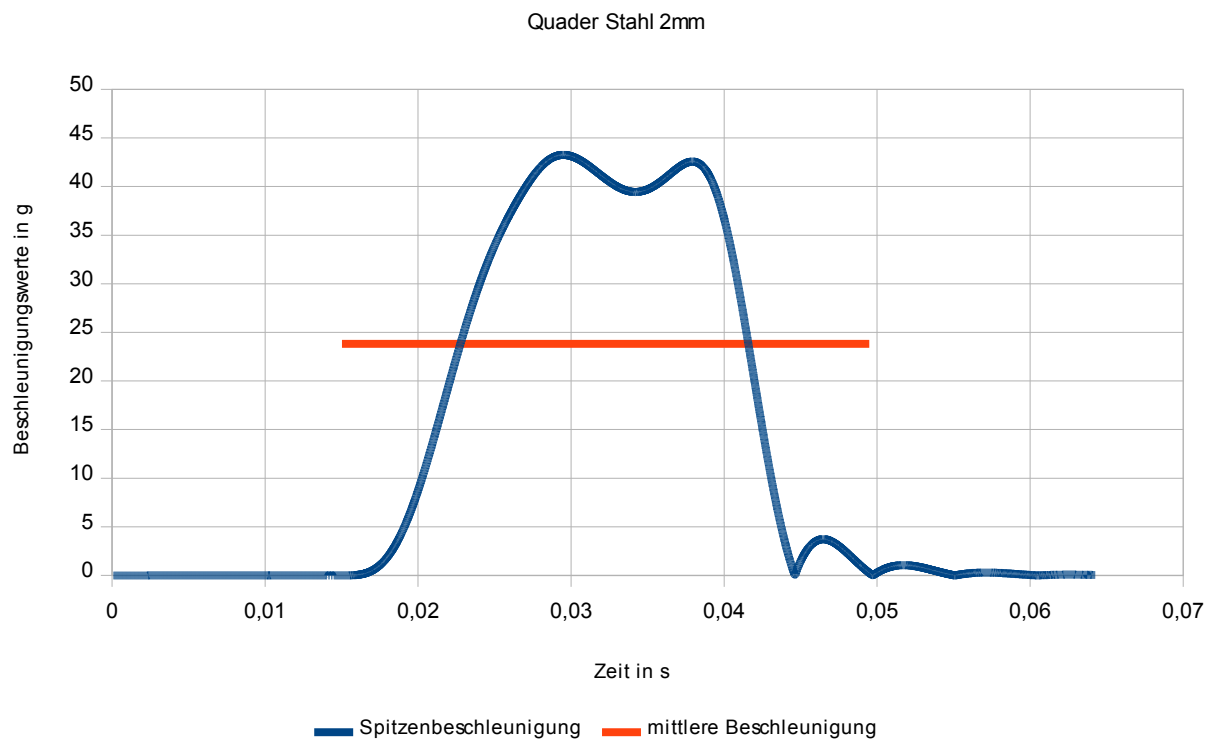


Abbildung 37: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Die maximale Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 43,26\text{g}$

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 23,83\text{ g}$

Bewertung der Simulationsergebnisse

Bei dieser Crashboxeinheit ist anhand der Simulationsergebnisse (Abbildung 35 und 36) deutlich zu erkennen, dass sich die Crashbox wenig verformt. Im Gegensatz dazu verformt sich die AI-Platte sehr stark und dringt somit weit in den Fahrerraum ein. Der größte Teil der Verformungsarbeit findet im Bereich der AI-Platte statt. Die Beschleunigungswerte liegen somit, sowohl für den zulässigen Spitzenwert als auch für den Mittelwert, über der Vorgabe vom Regelwerk.

4.1.4 Bauform Quader -Stahlblech – 1,5mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Stahl S235 JR
Materialstärke:	$t=1,5\text{ mm}$
Masse:	$m=2,051\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

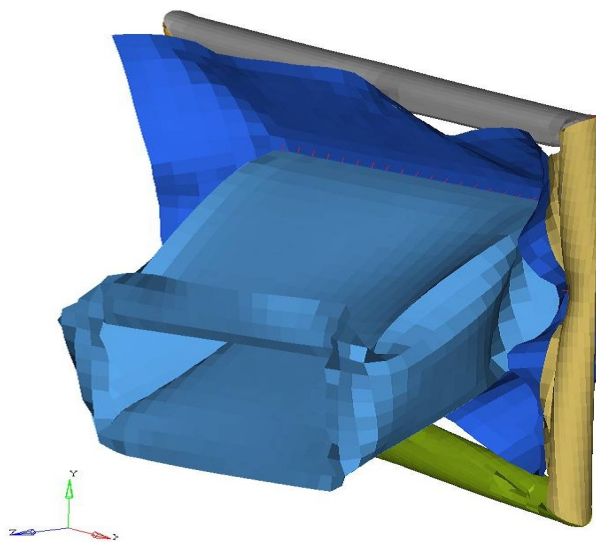


Abbildung 38: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation

Bauform Quader, Stahlblech S235JR, $t=1,5\text{ mm}$

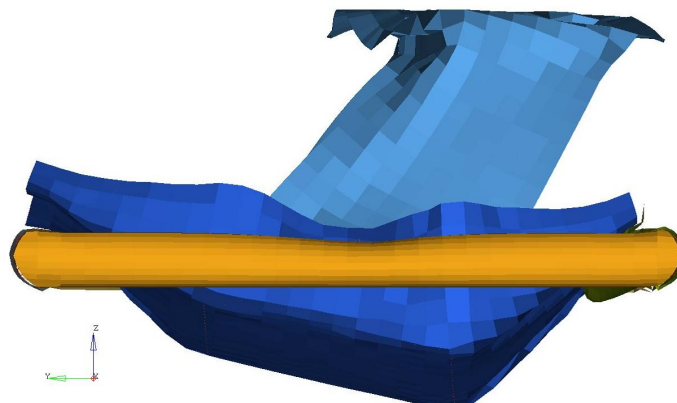
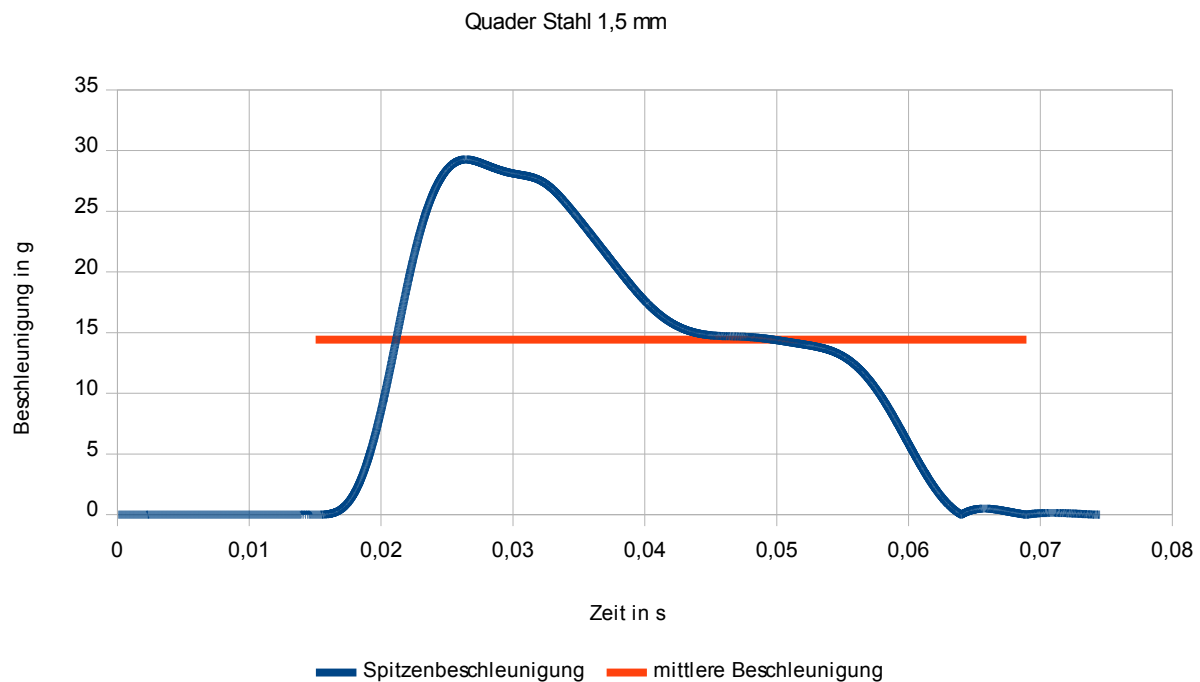


Abbildung 39: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation- Seitenansicht



Maximale Beschleunigung

Die maximale Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 29,26 \text{ g}$

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 14,41 \text{ g}$

Bewertung der Simulationsergebnisse

Bei einer Materialstärke der Box von $t=1,5 \text{ mm}$ verformt sich die AI-Platte sehr stark, wie in den Abbildungen 38 und 39 zu erkennen ist. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass die AI-Platte nicht in den Fußraum eindringt, was ein hohes Verletzungsrisiko für den Fahrer bedeutet. Im Vergleich zu einer Crashboxeinheit aus Aluminium verformt sich die AI-Platte der Crashboxeinheit aus Stahl stärker. Die Beschleunigungswerte liegen innerhalb der vom Regelwerk gegebenen Grenzen.

4.1.5 Bauform Quader -Stahlblech – 1,25mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Stahl S235 JR
Materialstärke:	$t=1,25\text{ mm}$
Masse:	$m=1,821\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

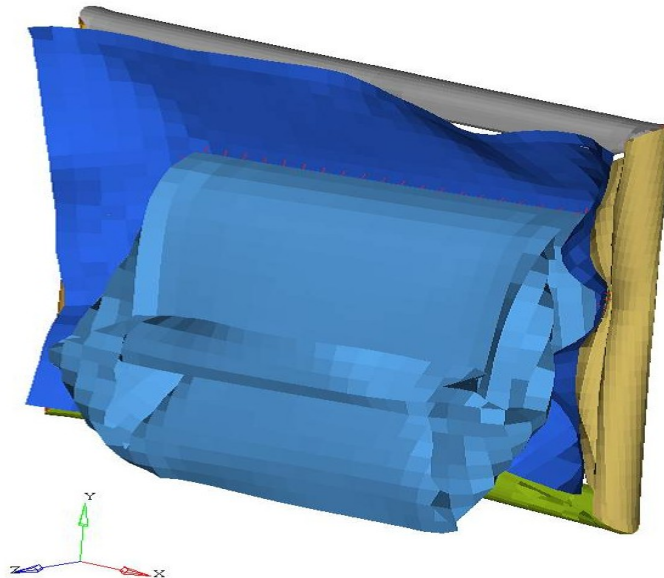


Abbildung 41: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation

Bauform Quader, Stahlblech S235JR, $t=1,25\text{mm}$

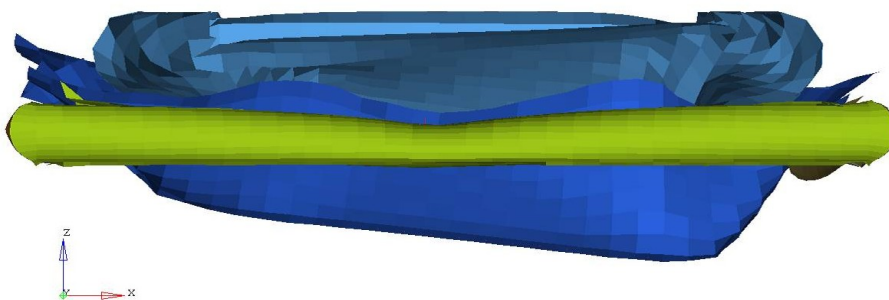


Abbildung 42: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation- Seitenansicht

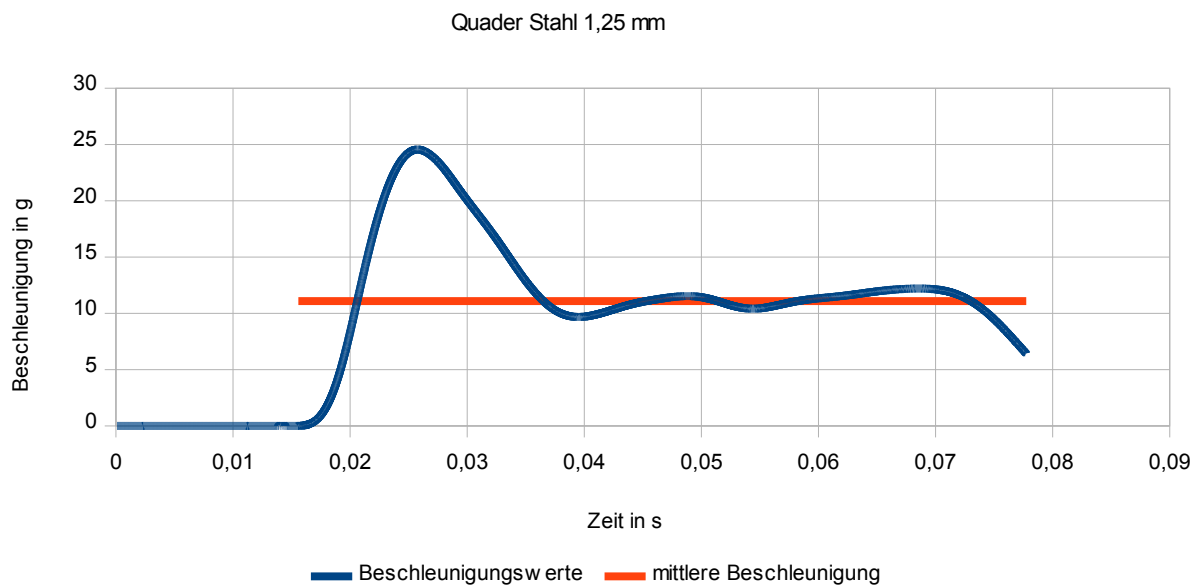


Abbildung 43: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Die maximale Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 24,54g$.

mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 11,08g$.

Bewertung der Simulationsergebnisse

In den Abbildungen 41 und 42 ist zu erkennen, dass die Box stark gefaltet ist und somit die kinetische Energie durch Verformungsarbeit gut abbaut. Die Box neigt sich zu einer Seite, was durch eine nicht mittige Fixierung zu erklären ist. Ein Durchbiegen der AI-Platte ist auch bei dieser Crashbox nicht zu verhindern, wodurch bei einem Versagen der Befestigung der Crashboxeinheit die Baugruppe in den Fahrerraum eindringen kann. Anhand der Spitzenwerte zwischen $T=0,02s$ und $T=0,04s$ ist zu erkennen, dass zu Beginn der Deformation der größte Anteil der Energie abgebaut wird. Die Beschleunigungswerte liegen innerhalb der vom Regelwerk geforderten Grenzen.

4.1.6 Bauform Quader -Stahlblech – 1,0 mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Quader
Material:	Stahl S235 JR
Materialstärke:	$t=1,0\text{ mm}$
Masse:	$m=1,590\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

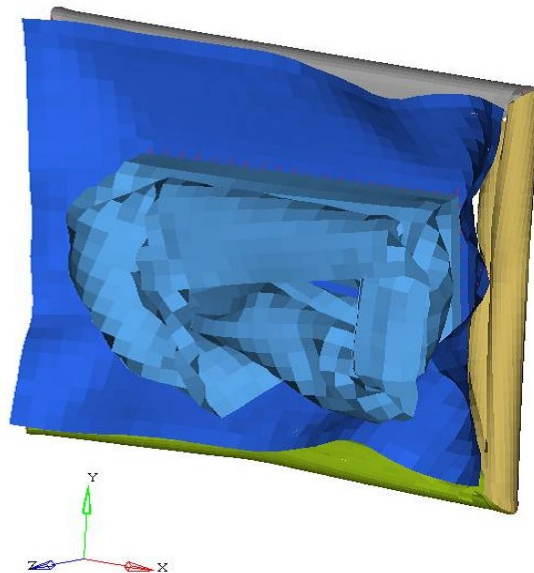


Abbildung 44: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation

Bauform Quader, Stahlblech S235JR, $t=1,0\text{ mm}$

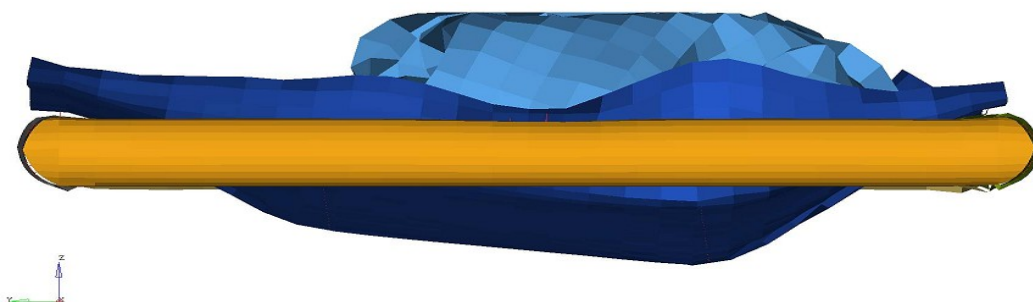


Abbildung 45: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation-Seitenansicht

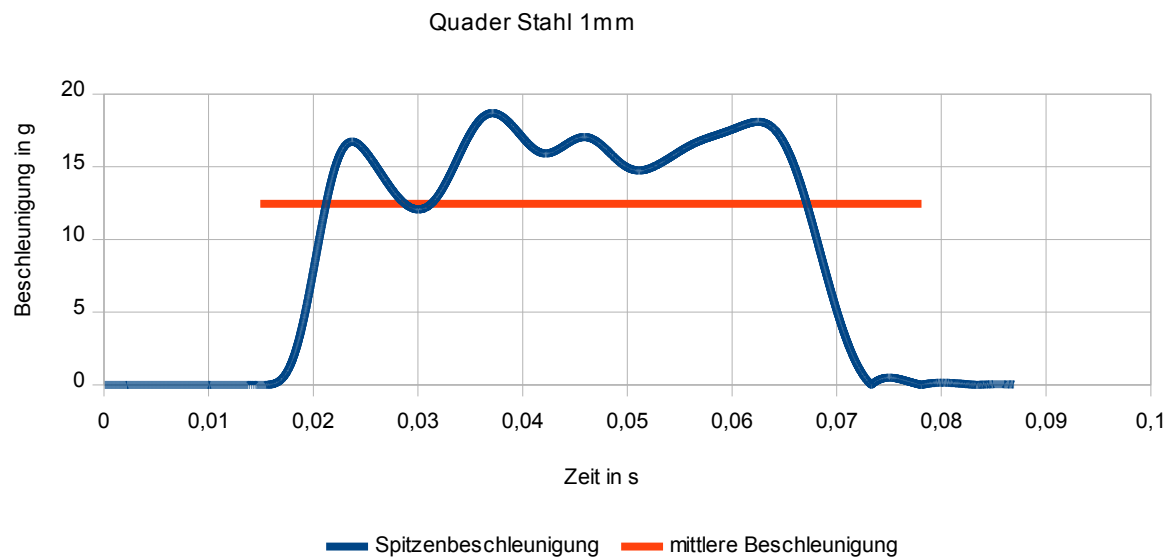


Abbildung 46: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Die maximale Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 16,73\text{g}$

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt laut Simulation $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 12,45\text{g}$

Bewertung der Simulationsergebnisse

Bei dieser Bauform findet der größte Teil der Verformung innerhalb der Crashbox statt, wie in Abbildung 44 und Abbildung 45 zu erkennen ist. Die AI-Platte verformt sich dagegen nur gering. Bei dieser Crashbox liegen die Beschleunigungswerte weit unter den Anforderungen vom Regelwerk. Der Graph in Abbildung 46 zeigt, dass die Beschleunigungswerte während der Deformation sehr gleichmäßig sind. Es sind kaum Beschleunigungsspitzen zu erkennen. Die Spitzenbeschleunigung liegt bei dieser Box weit unter den geforderten $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$ und unterhalb der geforderten $a_{\text{Mittelwert}} = 20\text{g}$. Aus diesen Werten ergibt sich ein Schutz des Piloten.

4.2 Simulationsergebnisse der Bauform Pyramidenstumpf

4.2.1 Bauform Pyramidenstumpf-Aluminiumblech – 2,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Pyramidenstumpf
Material:	Aluminium AlMg3
Materialstärke:	$t=2,0\text{ mm}$
Masse:	$m=1,965\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

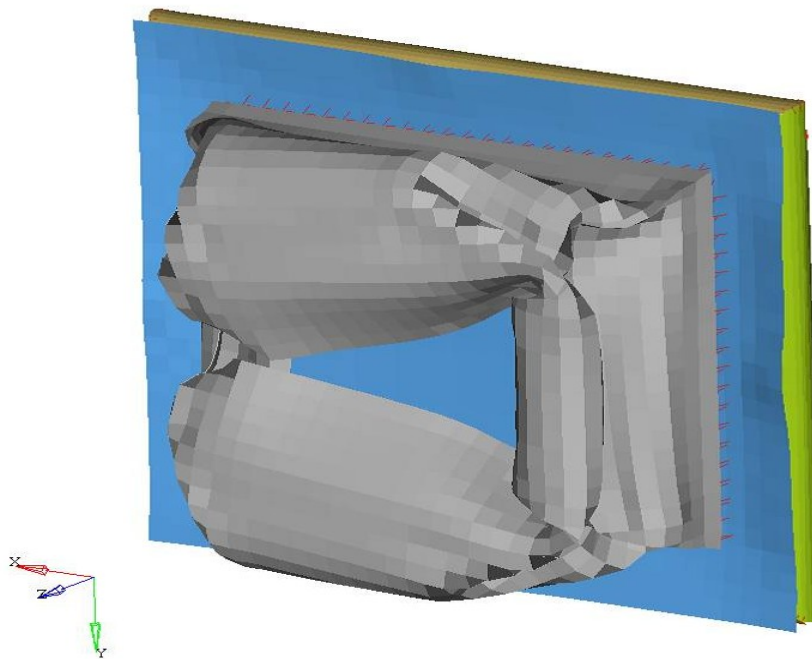


Abbildung 47: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,
Bauform Pyramidenstumpf, Aluminiumblech AlMg3, $t=2,0\text{ mm}$

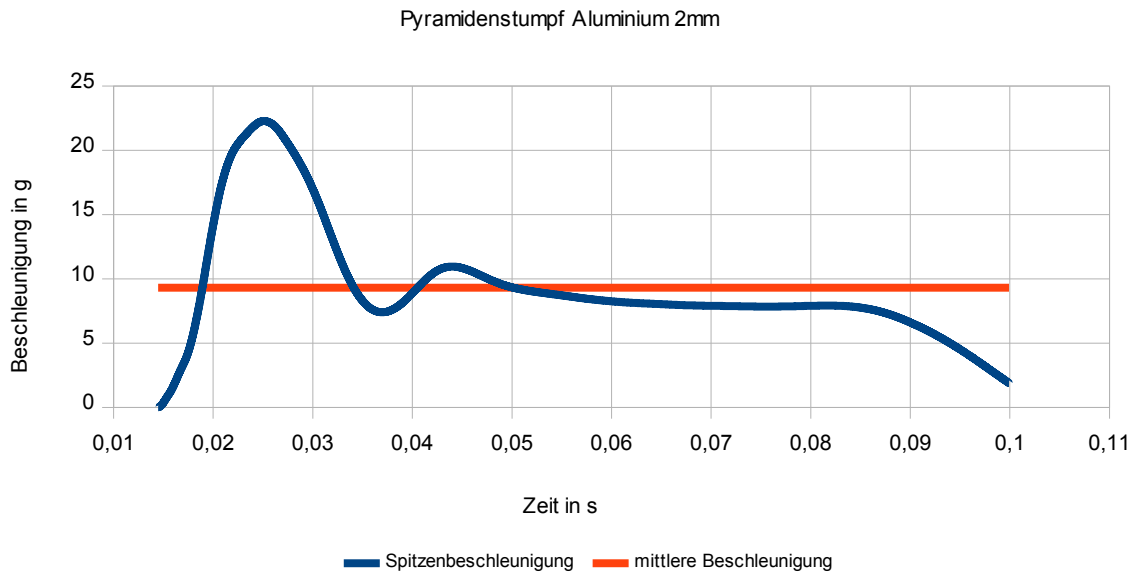


Abbildung 48: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Die Spitzenbeschleunigung beträgt $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 22,27\text{g}$ und erreicht einen Wert unterhalb der zulässigen Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$.

Mittlere Beschleunigung

Als mittlere Beschleunigung ergibt sich ein Wert von $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 9,32\text{g}$, welcher ebenfalls unterhalb des zulässigen Mittelwertes $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20\text{g}$ liegt.

Bewertung der Simulationsergebnisse

Eine vollständige Verformung der Crashbox ist nicht zu erkennen, wie das Simulationsergebnis in Abbildung 47 zeigt. Daraus lässt sich auf vorhandene Reserven schließen. Die AI-Platte verformt sich gering, wodurch ein Eindringen in den Fahrerraum nicht erwartet wird. Die erreichten Beschleunigungswerte, dargestellt in Abbildung 48, liegen weit unter den vom Regelwerk geforderten Werten.

4.2.2 Bauform Pyramidenstumpf-Aluminiumblech – 1,5mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform	Pyramidenstumpf
Material:	Aluminium AlMg3
Materialstärke:	$t=1,5\text{ mm}$
Masse:	$m=1,733\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation:

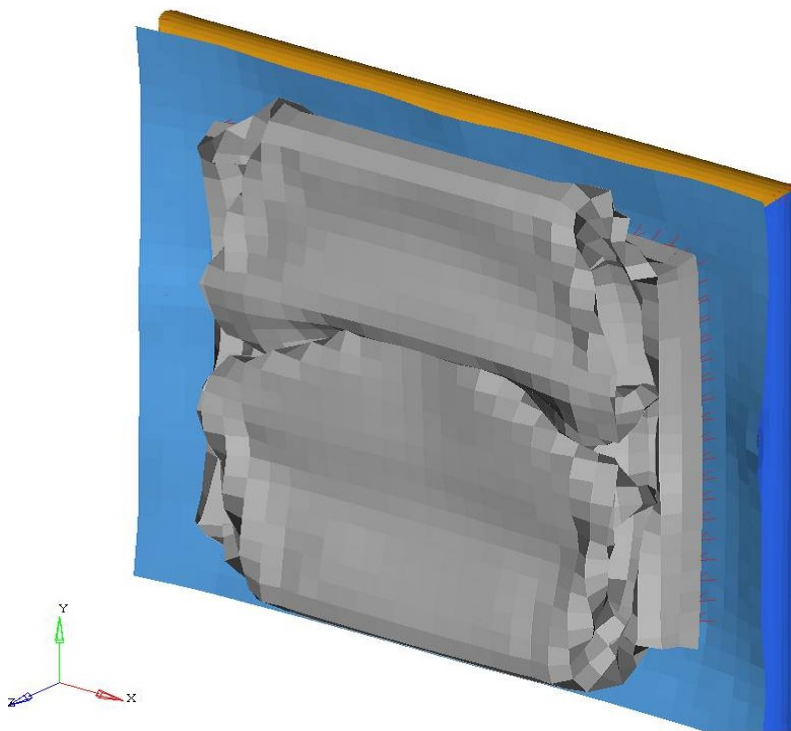


Abbildung 49: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,
Bauform Pyramidenstumpf, Aluminiumblech AlMg3, $t=1,5\text{ mm}$

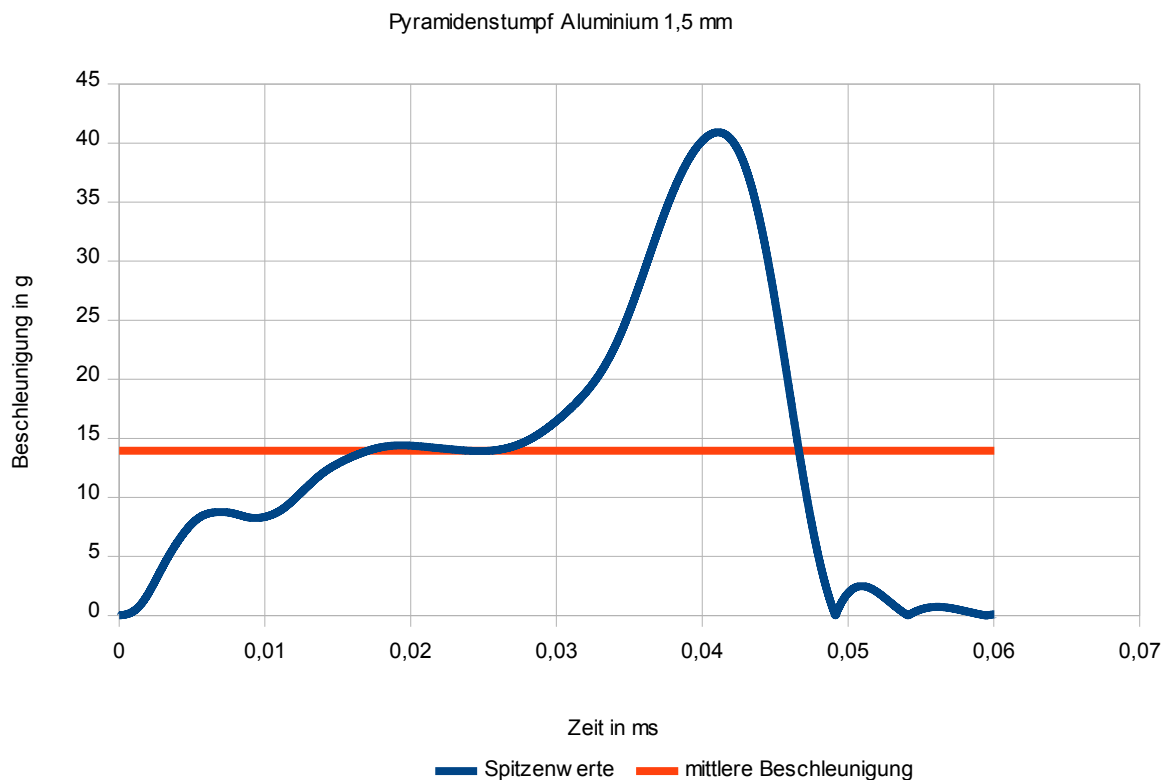


Abbildung 50: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Mit einer Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}=40,91\text{g}$ erreicht diese Crashboxeinheit einen Wert der größer als der zulässige Grenzwert $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}=40\text{g}$ ist.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt $a_{\text{Mittelwert_Simulation}}=13,94\text{g}$ und ist damit unterhalb der zulässigen $a_{\text{Mittelwert_zulässig}}=20\text{g}$.

Bewertung der Simulationsergebnisse:

Abbildung 49 zeigt, dass die Crashbox gefalten wird, wobei die AI-Platte nur sehr geringe Verformungen erfährt. Durch die starke Deformation der Box sind wenig Reserven vorhanden. Der Graph in Abbildung 50 zeigt, dass zum Ende der Deformation im Bereich um $T=0,04\text{s}$ der stärkste Abbau der Energie stattfindet. Die Werte der Spitzenbeschleunigung liegen mit $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}=40,91\text{g}$ über dem zulässigen vom Regelwerk gegebenen Grenzwert von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}=40\text{g}$.

4.2.3 Bauform Pyramidenstumpf-Stahlblech – 1,5mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Pyramidenstumpf

Material: Stahl S235 JR

Materialstärke: $t=1,5\text{ mm}$

Gewicht: $m=2,621\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

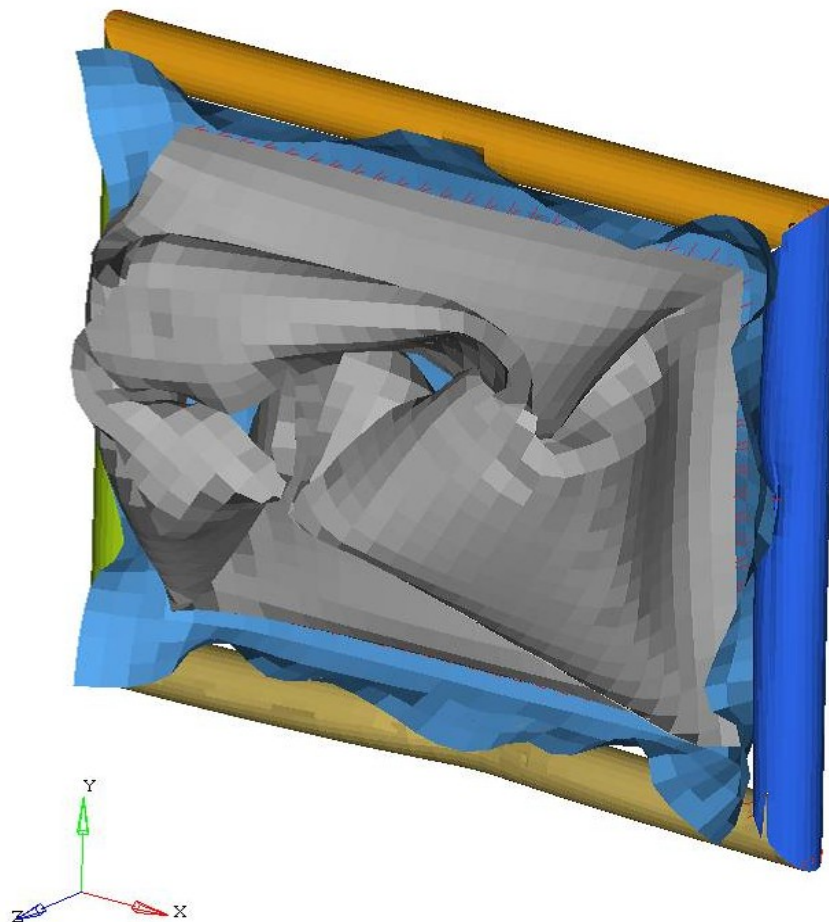


Abbildung 51: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,
Bauform Pyramidenstumpf, Stahlblech S235JR, $t=1,5\text{ mm}$

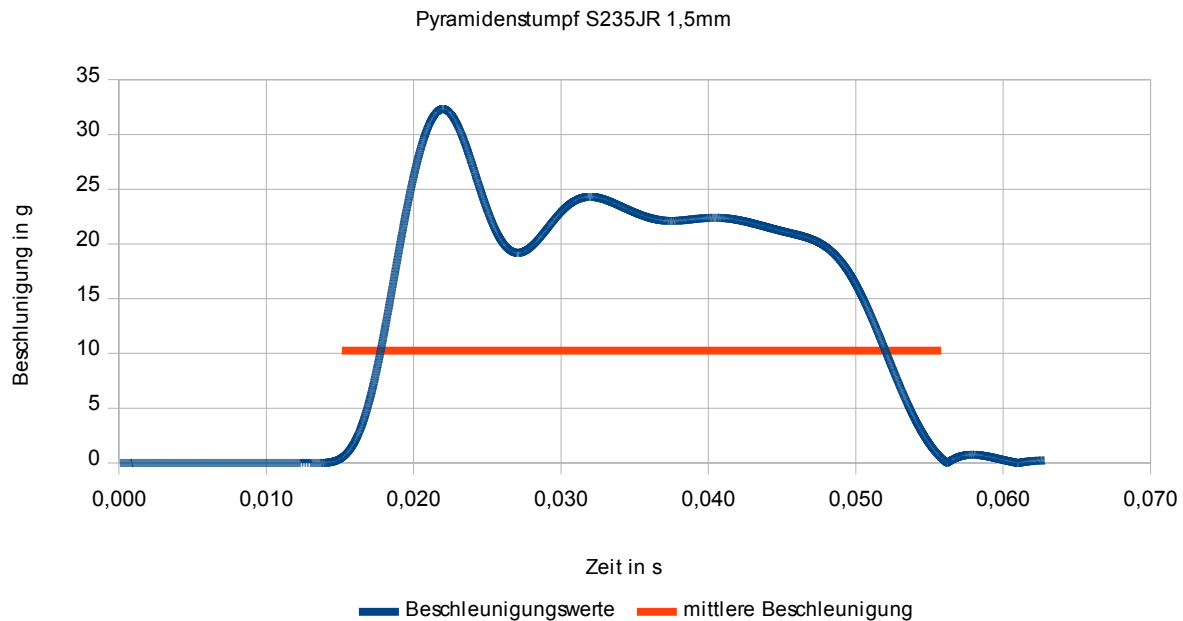


Abbildung 52: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Die Spitzenbeschleunigung beträgt $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 32,32\text{g}$ und liegt damit unter dem maximal zulässigen Wert von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 10,26\text{g}$ und ergibt somit einen Wert unterhalb der geforderten Höchstgrenze $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20\text{g}$.

Bewertung der Simulationsergebnisse

Diese Crashboxeinheit ist mit einer gesamten Masse von $m = 2,621\text{kg}$ die schwerste aller betrachteten Crashboxeinheiten. Das Ziel eine Gesamtmasse von $m_{\text{max}} = 3\text{kg}$ nicht zu überschreiten wurde erreicht. Abbildung 51 zeigt, dass die Faltung der Box nicht gleichmäßig ist. Die AI-Platte biegt sich bei dieser Crashboxeinheit leicht durch. Eine Gefährdung des Fahrers ist auf Grund der geringen Durchbiegung nicht zu erwarten. Die erreichten Beschleunigungswerte liegen unterhalb der geforderten Grenzen. Anhand des Graph in Abbildung 52 ist zu sehen, dass zu Beginn der Deformation im Bereich um $T = 0,02\text{s}$ der stärkste Abbau an kinetischer Energie stattfindet.

4.2.4 Bauform Pyramidenstumpf-Stahlblech – 1,25mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Pyramidenstumpf

Material: Stahl S235 JR

Materialstärke: $t=1,25\text{ mm}$

Gewicht: $m=2,293\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

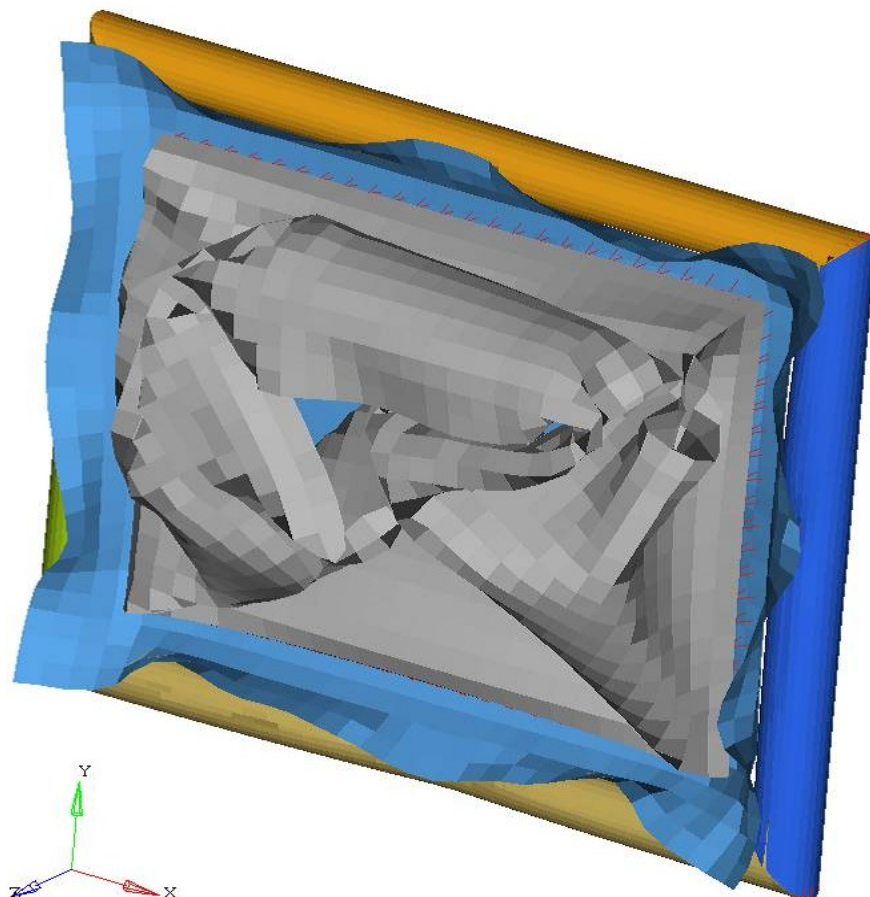


Abbildung 53: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,

Bauform Pyramidenstumpf, Stahlblech S235JR, $t=1,25\text{ mm}$

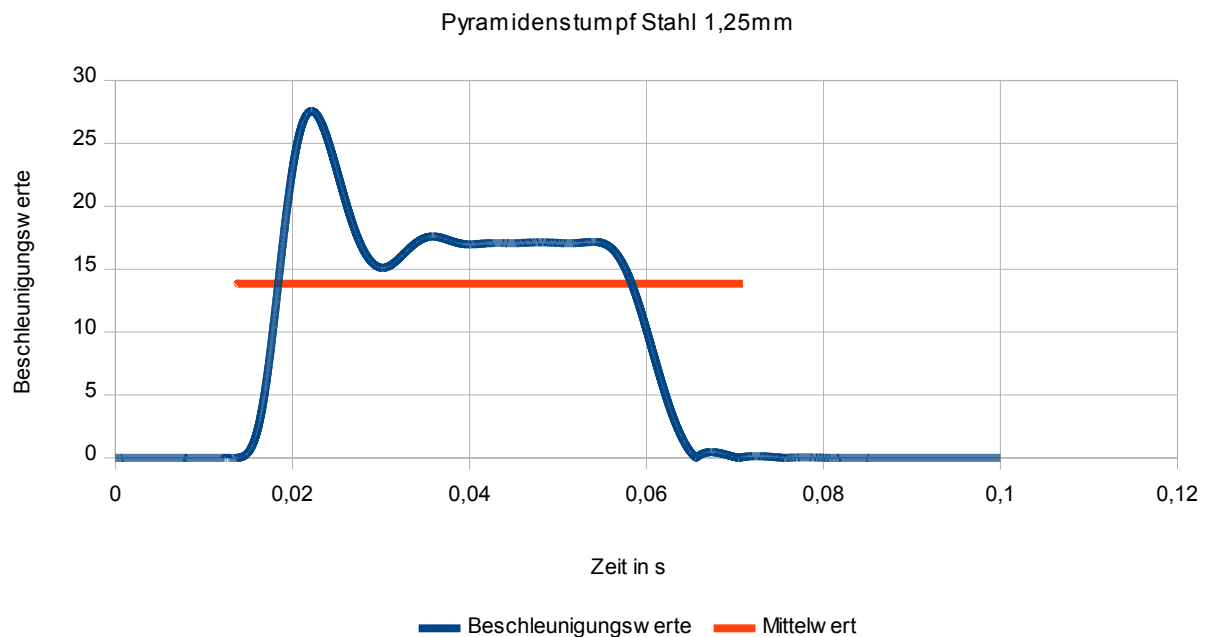


Abbildung 54: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Die Spitzenbeschleunigung beträgt $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 27,57\text{g}$ und ist damit kleiner als der maximal zulässige Wert für $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40\text{g}$.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 14,94\text{g}$ und ist damit unterhalb der geforderten $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20\text{g}$.

Bewertung der Simulationsergebnisse

Die Faltung ist unregelmäßig und führt zu einer stärkeren Verformung als bei der Crashbox mit einer Materialstärke von 1,5mm. Folglich ergeben sich wenig Reserven. Die AI-Platte wird wenig durch gebogen und somit ist die Gefährdung des Piloten gering. Die Beschleunigungswerte laut Simulation liegen weit unter den Vorgaben des Regelwerk. Abbildung 54 zeigt, dass auch bei dieser Variante, zu Beginn der Verformung bei $T=0,02\text{s}$ die höchsten Beschleunigungswerte ermittelt wurden.

4.2.5 Bauform Pyramidenstumpf-Stahlblech – 1,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Pyramidenstumpf

Material: Stahl S235 JR

Materialstärke: $t=1,0\text{ mm}$

Masse: $m=2,066\text{ kg}$

Ergebnisse der Simulation

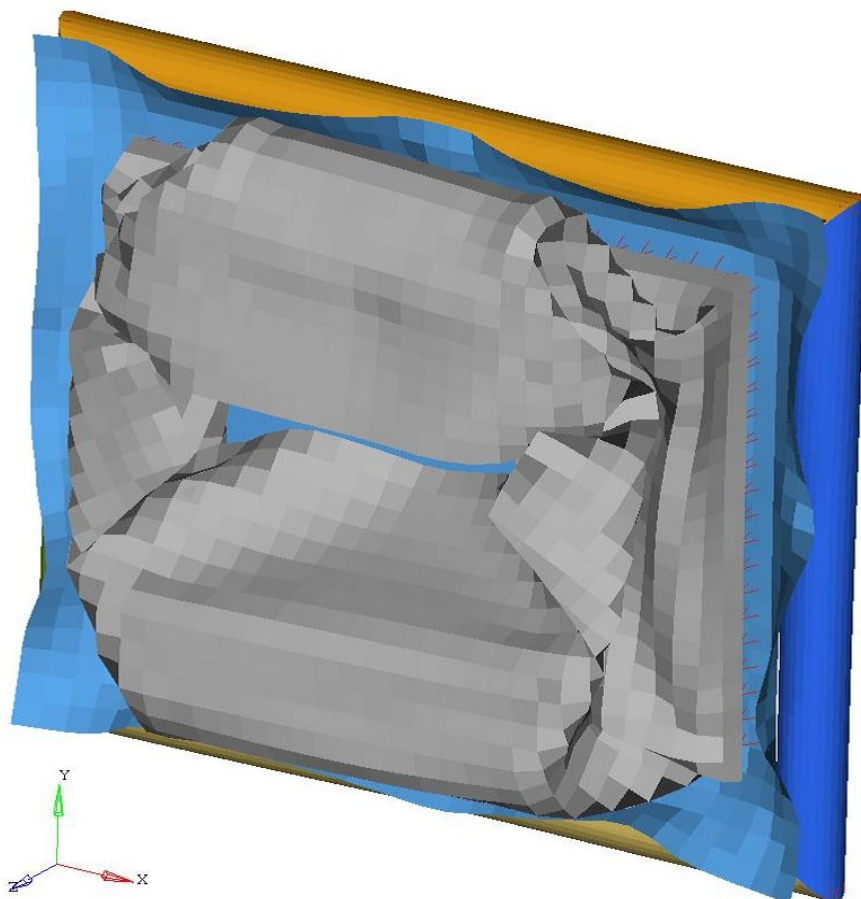


Abbildung 55: Verformung der Crashboxeinheit laut Simulation,
Bauform Pyramidenstumpf, Stahlblech S235JR, $t=1,0\text{ mm}$

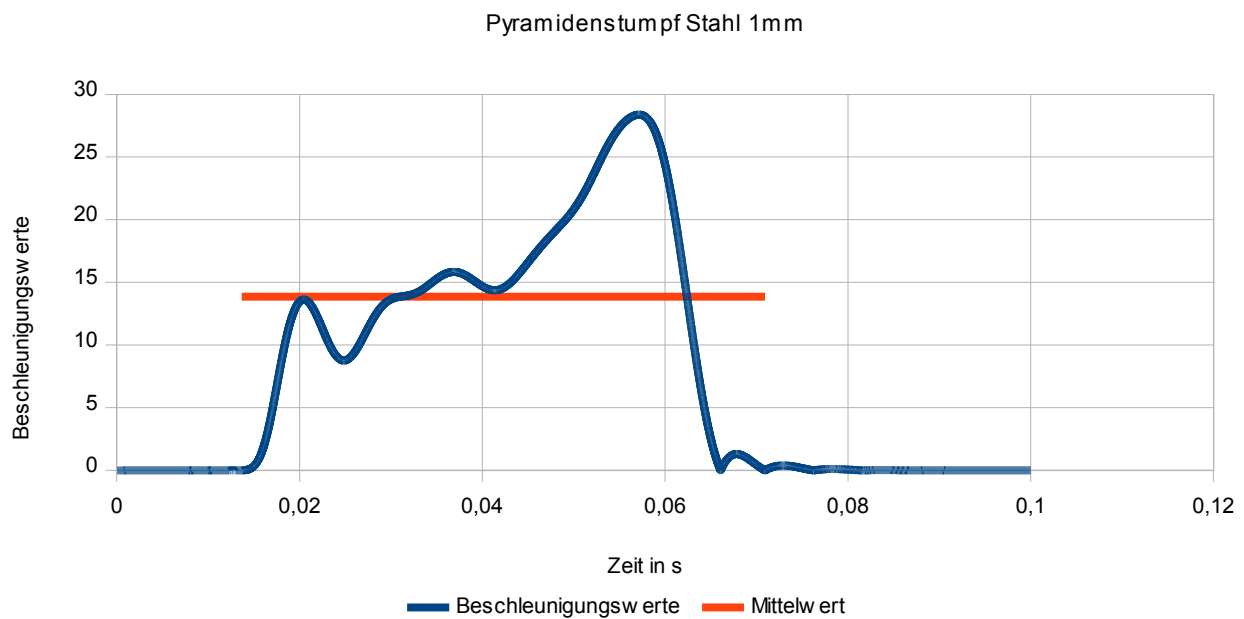


Abbildung 56: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Spitzenbeschleunigung

Mit einer Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}} = 28,38g$, liegt der erreichte Wert unter dem maximal zulässigen Wert von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}} = 40g$.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung beträgt $a_{\text{Mittelwert_Simulation}} = 13,85g$ und ist damit unterhalb der Höchstgrenze von $a_{\text{Mittelwert_zulässig}} = 20g$.

Bewertung der Simulationsergebnisse

In Abbildung 55 zeigt sich eine gleichmäßige Verformung der Crashbox und eine geringe Durchbiegung der AI-Platte, so dass ein guter Schutz für Fahrer und Fahrzeug gegeben ist. Auf Grund der starken Zusammenfaltung der Box ergeben sich kaum Reserven bei höheren Geschwindigkeiten. Die Beschleunigungswerte liegen weit unter der vom Regelwerk vorgegebenen Werte, wobei, wie in Abbildung 56 ist zu sehen, dass zum Ende der Deformation um $T=0,06s$ die Spitzenbeschleunigungswerte erreicht werden.

4.3 Auswertung der Simulation

Nachdem alle Modellvarianten simuliert und betrachtet wurden, muss entschieden werden, welche der Crashboxeinheiten auf dem Prüfstand getestet werden. Hierzu werden alle Boxen mit den wichtigsten Ergebnissen tabellarisch aufgeführt. Die Crashboxeinheiten werden entsprechend ihrer Bauform und der verwendeten Materialien in 4 Gruppen eingeteilt. Aus jeder Gruppen wird die Crashbox mit den niedrigsten Spitzenbeschleunigungswerten auf einem Fallturm getestet. Die zu testenden Varianten sind in Tabelle 2 mit einem Haken markiert. Die Varianten, die auf Grund der Simulationsergebnisse nicht in Frage kommen, sind mit einem Kreuz gekennzeichnet.

Nicht gekennzeichnete Varianten, haben Werte innerhalb der gegebenen Grenzen erreicht und werden erst beim Versagen der bevorzugten Boxen zu zusätzlichen Tests herangezogen.

Tabelle 2: Auswahl der zu testenden Crashboxen

Nr.	Bauform	Material	Materialstärke t in mm	Spitzenbeschleunigung a in g	Mittlere Beschleunigung a in g	Test
1	Quader	S 235 JR	2	43,26	23,83	X
2	Quader	S 235 JR	1,5	29,26	14,41	
3	Quader	S 235 JR	1,25	24,54	11,08	
4	Quader	S 235 JR	1	<u>16,73</u>	12,45	✓
5	Quader	Al Mg3	2	<u>25,12</u>	11,55	✓
6	Quader	Al Mg3	1,5	28,46	15,37	
7	Pyramid.	S 235 JR	1,5	32,32	10,26	
8	Pyramid	S 235 JR	1,25	<u>27,57</u>	14,94	✓
9	Pyramid	S 235 JR	1	28,38	13,85	
10	Pyramid	Al Mg3	2	<u>22,27</u>	9,32	✓
11	Pyramid	Al Mg3	1,5	40,91	13,94	

Die Boxen, welche getestet werden sind in der Bauform Quader, die Crashbox aus Aluminiumblech mit einer Materialstärke von $t=2\text{mm}$ und die aus Stahlblech mit einer Materialstärke von $t=1,25\text{mm}$. In der Bauform Pyramidenstumpf werden die Crashbox aus Aluminiumblech mit einer Materialstärke von $t=2\text{mm}$ und die aus Stahlblech mit einer Materialstärke von $t=1,25\text{mm}$ mittels eines Falltests geprüft.

5 Experimentelle Untersuchung

5.1 Der Testaufbau



Abbildung 57: Fallturm

In Abbildung 57 ist der Fallturm, auf dem die Crashtests durchgeführt werden, mit montierter Crashboxeinheit und zusätzlichen Massestücken zu erkennen. Es handelt sich dabei um einen Schlitten, der durch zwei Schienen geführt wird. Die Fallhöhe ist variabel einstellbar und beträgt maximal 27m.. Der Testaufbau wird unterhalb des Schlittens angebracht. Auf dem Schlitten werden die zusätzlichen Massestücke montiert, damit die für den Test nötige Masse von 300 kg erreicht wird. Bedingt durch die Masse der Crashboxeinheit und der vorhandenen Zusatzgewichte wurde eine Gesamtmasse von $m=311\text{kg}$ für die Test ermittelt. Die Test wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Phantom V7 800 x 600 Pixel SR mit CMOS Sensor, 8 Bit monochrome 4.800 Bilder/Sekunde aufgezeichnet. Die Bilder werden zur Auswertung genutzt.

Fallhöhe

Laut Regelwerk ist eine Aufprallgeschwindigkeit von $v=7\text{m/s} = 25\text{km/h}$ gefordert. Da der Crashtest auf einem Fallturm durchgeführt wird, ist die Berechnung der Fallhöhe nötig. Die notwendige Fallhöhe, um beim Aufprall eine Geschwindigkeit von $v=7\text{m/s}$ zu erreichen, ist.

$$h_{\text{Fall}} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad h_{\text{Fall}} = \frac{(7\text{m/s})^2}{2 \cdot 9,81\text{m/s}^2} \quad h_{\text{Fall}} = \underline{2,50\text{m}}$$



Abbildung 58: Messeinrichtung zur Ermittlung der angehängten Masse

Abbildung 58 zeigt die Messeinrichtung zur Ermittlung der gesamten angehängten Masse. Die Messung wird mittels einer Brückenschaltung mit Dehnmessstreifen durchgeführt



Abbildung 59: Anzeigeeinheit der Waage



Abbildung 60: Ermittlung der Fallhöhe mittels Lasermessung

In Abbildung 59 ist das Ergebnis der Messung der Gesamtmasse zu sehen. In diesem Fall $m_{\text{Mess}}=311\text{kg}$. Vorgabe vom Regelwerk sind mindestens $m_{\text{Zusatz}}=300\text{kg}$, was die Gesamtmasse eines Formula Student- Rennwagen simuliert. Mittels Lasermessung wird sichergestellt, dass die Fallhöhe von $h_{\text{Fall}}=2,50\text{m}$ eingehalten wird. Abbildung 60 zeigt, dass laut Messung eine Höhe von $h_{\text{Mess}}=2,70\text{m}$ vorhanden ist. Dies ergibt sich daher, dass von der Crashplatte bis zum Schlitten des Fallturms gemessen wird.



Abbildung 61: Haltemechanismus

Mittels Knopfdruck öffnet der Haltemechanismus (Abbildung 61) und der Schlitten mit den Zusatzmassen und der Crashboxeinheit bewegt sich im freien Fall auf die Prallfläche (Abbildung 62) zu. Unter der Prallfläche sind die Sensoren für die Messung angebracht. Es handelt sich hierbei um Kraftmesser vom Typ Kistler Smarth Crash type 9350A 3-axe. Die Beschleunigungswerte werden als Kraft/Zeiteinheit (F/T) ausgegeben. Entsprechend der Gleichung $a = \frac{F}{m}$ werden aus den Ergebnissen die Beschleunigungswerte berechnet.



Abbildung 62: Prallfläche

5.2 Ergebnisse der Fallversuche

5.2.1 Bauform Quader -Aluminiumblech – 2,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Quader
 Material: Aluminum Almg3
 Materialstärke: t=2,0 mm

Ergebnisse vom Falltest

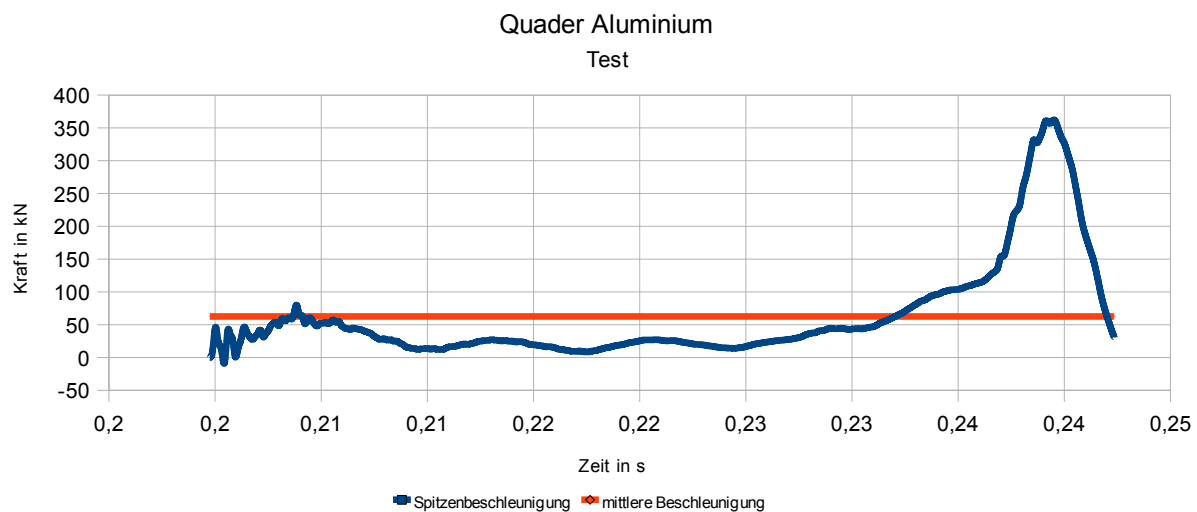


Abbildung 63: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Während des Falltest wurde eine maximale Kraft $F=362,33\text{kN}$ ermittelt. Dies entspricht einer Spitzenbeschleunigung von:

$$a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{363.330\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \underline{119,08 \text{ g}}$$

Mittlere Beschleunigung

Aus den Ergebnissen des Falltest wurde eine mittlere Kraft $F=62,46\text{kN}$ ermittelt. Es ergibt sich eine mittlere Beschleunigung von:

$$a_{\text{Mittelwert}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \frac{62.460\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \underline{20,46 \text{ g}}$$

Analyse der Ergebnisse vom Falltest

Im Falltest konnten die Simulationswerte für eine Spitzenbeschleunigung von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}=25,12g$ und eine mittlere Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert_Simulation}}=11,55g$ nicht bestätigt werden. Mit einer Spitzenbeschleunigung im Falltest von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}=135,78g$ und einer mittleren Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert}}=21,01g$, werden die vom Regelwerk als Höchstgrenze gesetzten Werte deutlich überschritten.

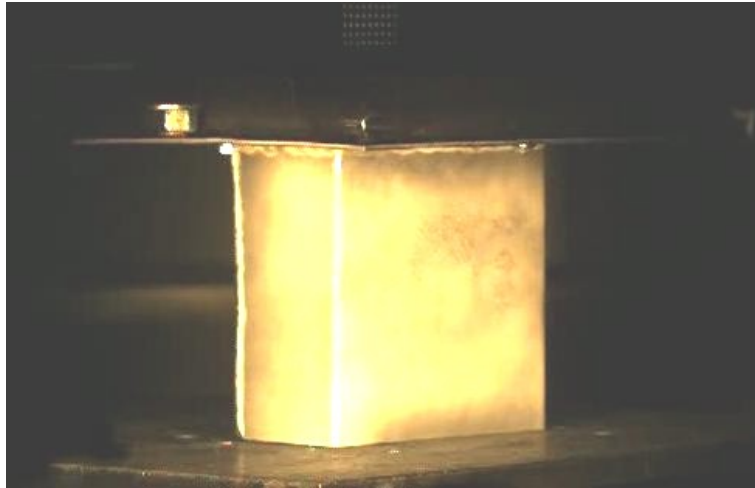


Abbildung 64: Crashbox während des Falltest

In Abbildung 64 ist die Crashboxeinheit im Moment des ersten Kontakts mit der Prallfläche des Fallturm zu sehen

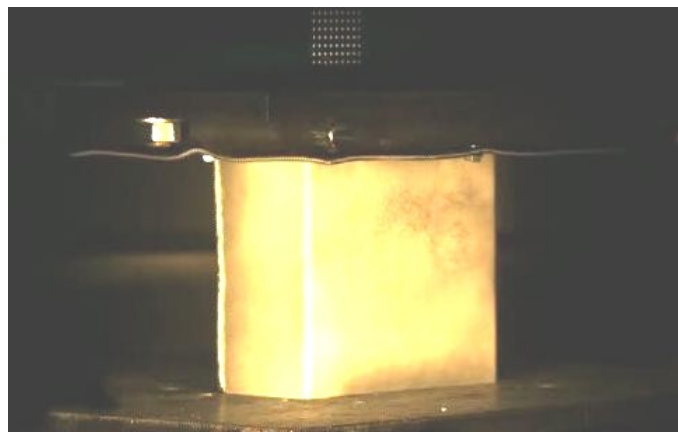


Abbildung 65: Einknicken der AI-Platte

Abbildung 65 zeigt die Verformung der AI-Platte. Dies geschieht bevor die Verformung der Crashbox beginnt.



Abbildung 66: Verformung der Crashbox

Nachdem die AI-Platte keine Verformung mehr zulässt, beginnt die Deformation des Verformungskörpers der Crashboxeinheit, wie Abbildung 66 zeigt.

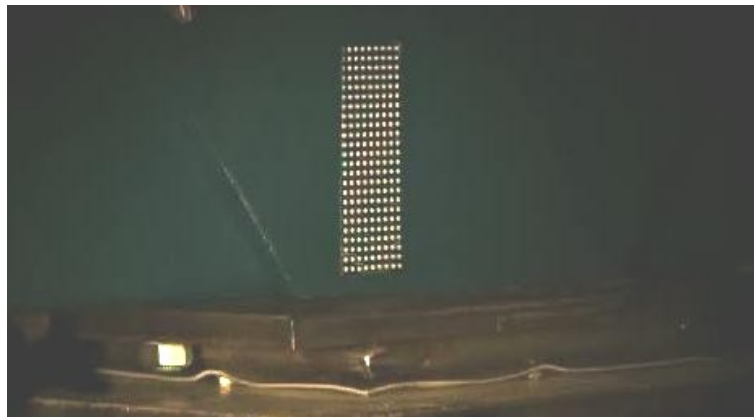


Abbildung 67: Bulkhead prallt auf Testplatte

Zu Abbildung 67. Die Crashbox ist komplett im Zwischenraum zwischen Testplatte und der Befestigung der Crashboxeinheit zusammengefallen. Folglich trifft das Bulkhead auf die Testplatte des Fallturms und wegen der hohen Steifigkeit führt dies zu den hohen Beschleunigungswerten, wie der Graph, Abbildung 63 zeigt. Die hohen Beschleunigungswerte treten im Bereich um $T=0,024s$ auf, wenn das Bulkhead auf die Testplatte prallt.

5.2.2 Bauform Quader-Stahlblech – 1,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Quader
 Material: Stahl S235 JR
 Materialstärke: $t=1,0\text{ mm}$

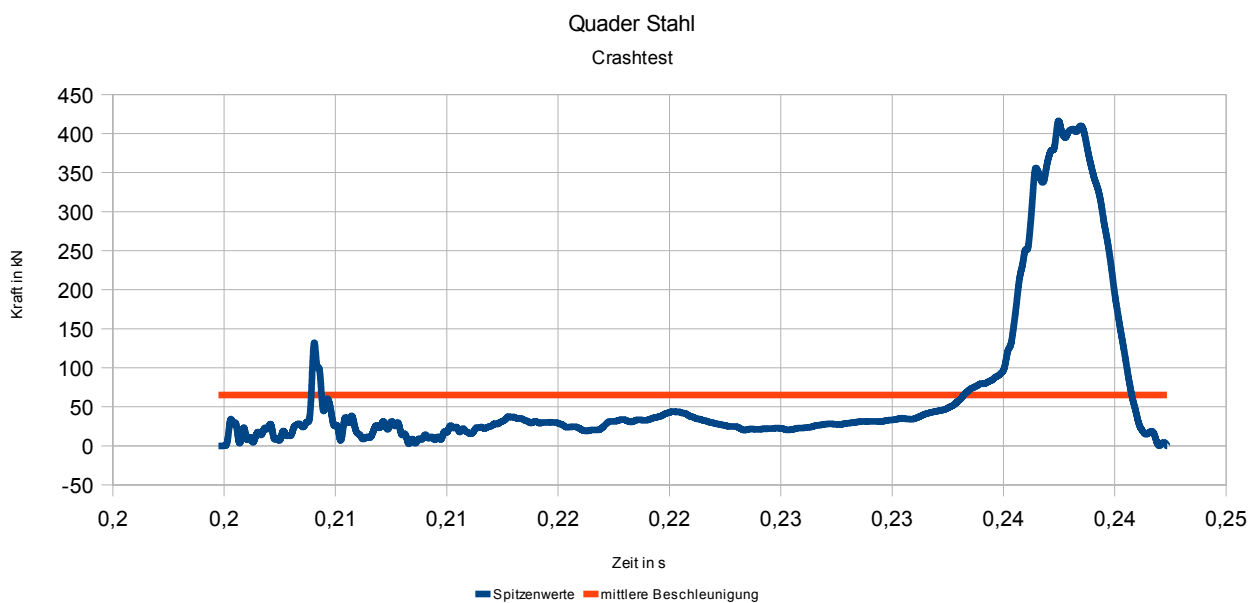
Ergebnisse vom Falltest

Abbildung 68: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Während des Falltest wurde eine maximale Kraft $F=415,66\text{kN}$ ermittelt. Dies entspricht einer Beschleunigung von:

$$a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{415.660\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \underline{136,24\text{ g}}$$

Mittlere Beschleunigung

Aus den Ergebnissen des Falltest wurde eine mittlere Kraft $F=65,12\text{kN}$ ermittelt. Die entspricht einer mittleren Beschleunigung von:

$$a_{\text{Mittelwert}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \frac{65120\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \underline{21,34\text{ g}}$$

Analyse der Ergebnisse vom Falltest

In der Simulation hat diese Crashbox ein Spitzenbeschleunigung von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}=16,73\text{g}$ erreicht und eine mittlere Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert_Simulation}}=12,45\text{g}$. Die im Test erzielten Werte liegen weit über den der Simulation. Mit einer Spitzenbeschleunigung von $a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}=136,24\text{g}$ und einer mittleren Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert}}=21,34\text{g}$, werden die vom Regelwerk als Höchstgrenze gesetzten Werte deutlich überschritten.

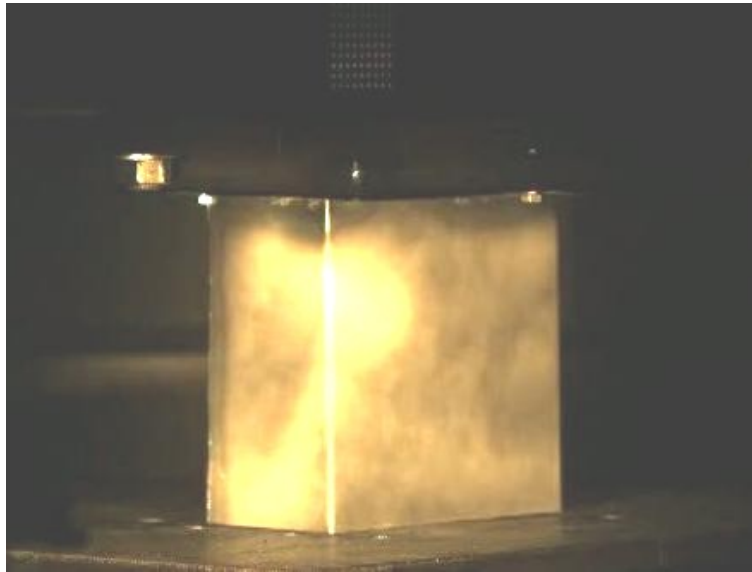


Abbildung 69: Crashbox während Crashtest

In Abbildung 69 ist die Crashboxeinheit im Moment des ersten Kontakts mit der Prallfläche des Fallturm zu sehen.

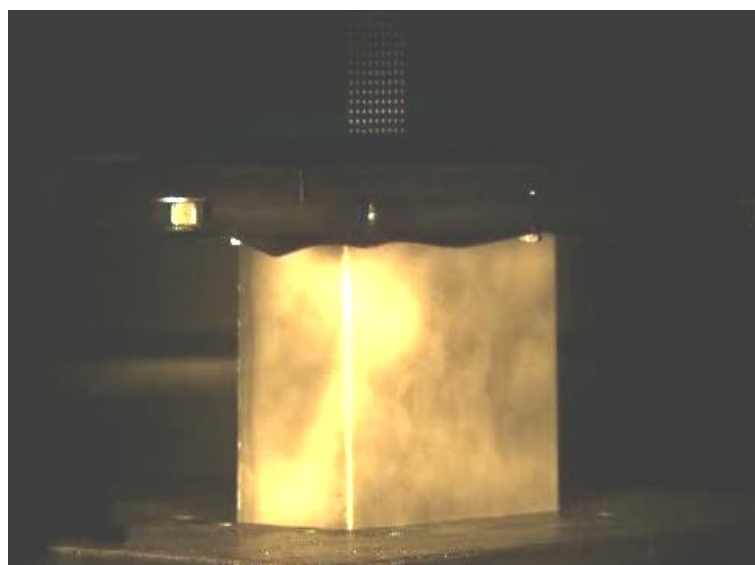


Abbildung 70: Einknicken der AI-Platte

Abbildung 70 zeigt, dass die AI-Platte sich vor der Crashbox verformt. Die AI-Platte verformt sich bis sie auf die Befestigung der Crashboxeinheit trifft und ein weiteres Verformen wird dadurch verhindert. Diese Begrenzung ist beim Rennauto nicht vorhanden, wodurch die Sicherheit des Fahrers gefährdet ist.

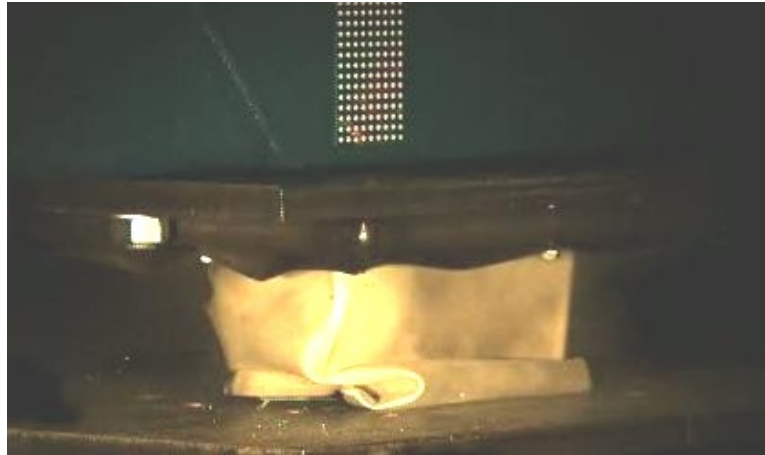


Abbildung 71: Verformung der Crashbox

Nachdem die AI-Platte keine Verformung mehr zulässt, beginnt die Deformation des Verformungskörpers der Crashboxeinheit. Abbildung 71 zeigt die Deformation der Crashbox.



Abbildung 72: Bulkhead prallt auf Testplatte

Zu Abbildung 72. Die Crashbox ist komplett im Zwischenraum zwischen Testplatte und der Befestigung der Crashboxeinheit zusammengefallen und ist somit nicht in der Lage weitere Kräfte aufzunehmen. Als Folge trifft das Bulkhead auf die Testplatte, was zu den hohen Beschleunigungswerten führt. Dies ist im Graph in Abbildung 68 im Bereich $T=0,024s$ anhand des hohen Ausschlag zu erkennen.

5.2.3 Bauform Pyramidenstumpf-Aluminiumblech – 2,0mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Pyramidenstumpf
 Material: Aluminum AlMg3
 Materialstärke: 2,0 mm

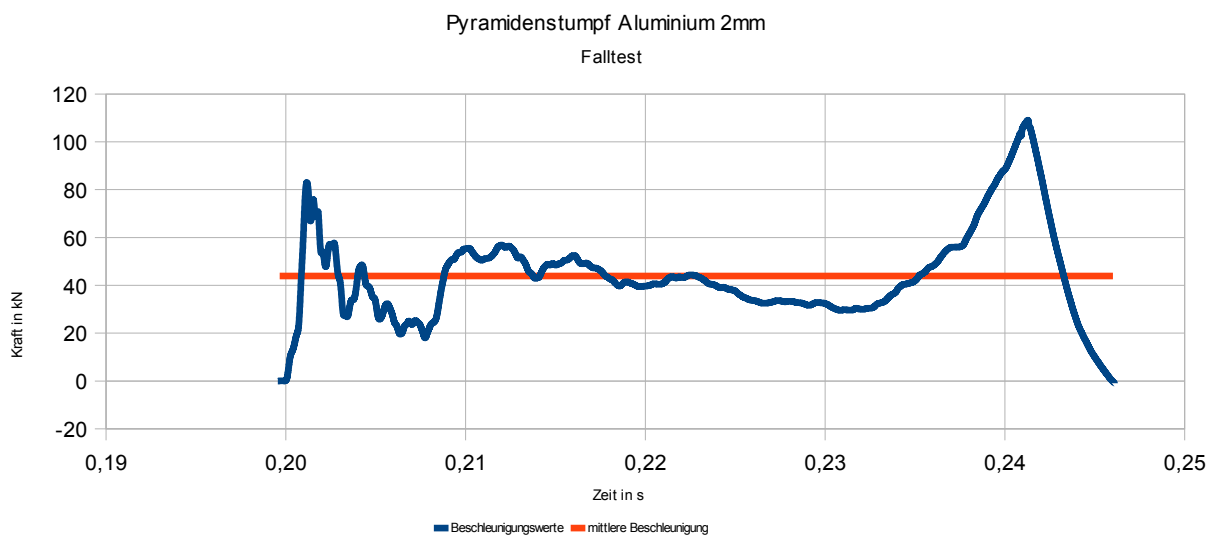


Abbildung 73: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Beim Versuch wurden Spitzenwerte von $F=108,93\text{kN}$ erreicht. Somit ergibt sich eine Spitzenbeschleunigung von:

$$a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{F}{m \cdot g} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \frac{108.930\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Spitzenbeschleunigung}} = \underline{35,70\text{g}}$$

Damit wurden die maximal zulässigen $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_zulässig}}=40\text{g}$ nicht überschritten. Die Ergebnisse der Crashtest mit $a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}=35,70\text{g}$ weichen von den Simulationsergebnissen mit $a_{\text{Spitzenbeschleunigung_Simulation}}=22,27\text{g}$ ab.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigungskraft beträgt $F=43,85\text{kN}$. Dies entspricht einer mittleren Beschleunigung von:

$$a_{\text{Mittelwert}} = \frac{F}{m \cdot g} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \frac{43.850\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \underline{16,33 \text{ g}}$$

Die maximal zulässige mittlere Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert_zulässig}}=20\text{g}$ wurde nicht überschritten.

Somit werden alle vom Regelwerk gegebenen Werte eingehalten, jedoch kommt es auch hier zu einem Abweichen von den Simulationsergebnissen mit $a_{\text{Mittelwert_Simulation}}=9,32\text{g}$.

Analyse der Ergebnisse vom Falltest

Abbildung 74: Crashbox nach dem Auftreffen auf Testplatte

Abbildung 74 zeigt die Baugruppe kurz nach dem Auftreffen auf die Grundplatte des Fallturms.

Innerhalb der grauen Markierung ist die Schweißnaht, welche die AI-Platte mit dem Verformungskörper verbindet, zu erkennen. Die AI-Platte verformt sich nur gering, wodurch ein Eindringen in den Fahrerraum ausgeschlossen werden kann.

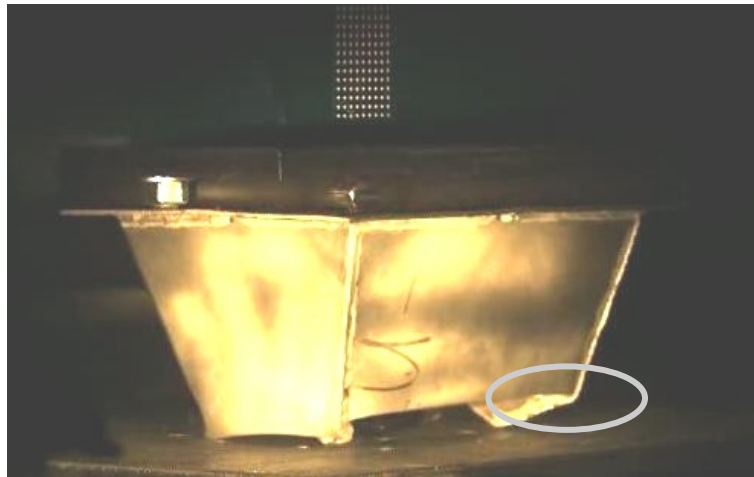


Abbildung 75: Einknicken der Crashbox während des Crashtest

In Abbildung 75 ist das Einknicken der Crashbox zu erkennen. Die geschieht auf Grund der herstellungsbedingten Ungleichmäßigkeit der Schweißnaht. Im Vergleich zum Schweißen von Stahl ist Aluminium schwieriger, da hier mit Wechselstrom gearbeitet werden muss. Durch die Unregelmäßigkeit verformt sich die Box nicht gleichmäßig und es entsteht eine Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den Ergebnissen aus dem Crashtest. Während die Box beim Test einknickt, kann sie die kinetische Energie nicht durch Verformungsarbeit abbauen.

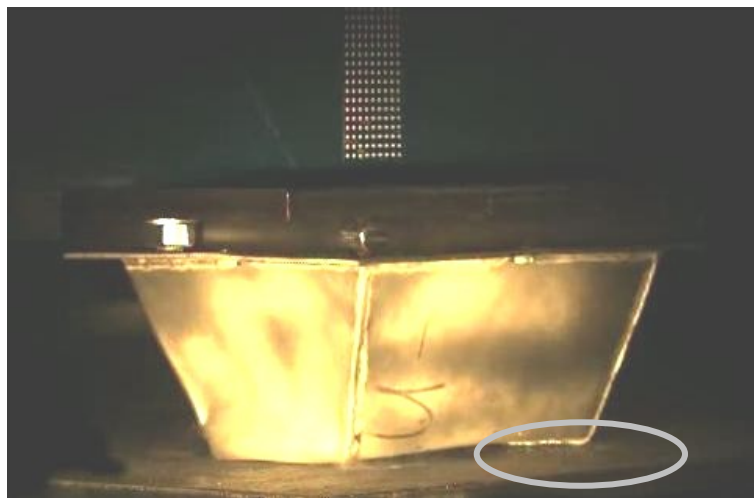


Abbildung 76: Auftreffen der Knickstelle auf Prallfläche

Nach dem Auftreffen der Knickstelle auf die Prallfläche, in Abbildung 76 grau markiert, verformt sich die Box gleichmäßig, wie in Abbildung 77 zu erkennen ist.

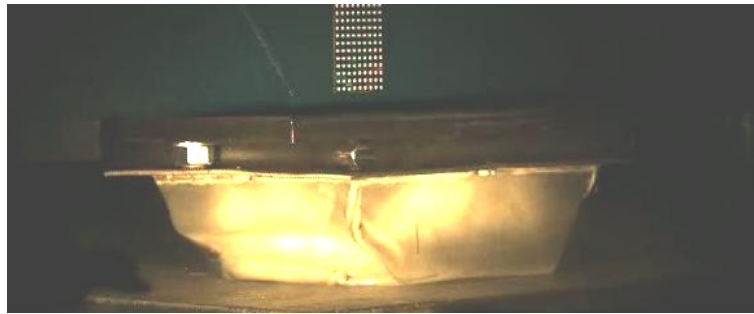


Abbildung 77: Verformung der Crashbox

Durch das Einknicken wurde die kinetische Energie nicht abgebaut, so dass beim Auftreffen der Knickstelle eine hohe Restenergie vorhanden ist. Diese wird auf dem verkürzenden Verformungsweg abgebaut, wodurch höhere Spitzenbeschleunigungswerte als in der Simulation die Folge sind.



Abbildung 78: Vollständig abgebaute Geschwindigkeit

Abbildung 78 zeigt die verformte Crashbox nach dem die Geschwindigkeit vollständig abgebaut ist. Das Bulkhead prallt bei dieser Bauform nicht auf die Prallfläche.

5.2.4 Bauform Pyramidenstumpf-Stahlblech – 1,25mm

Merkmale der Crashboxeinheit

Bauform: Pyramidenstumpf

Material: Stahl S235 JR

Materialstärke: 1.25 mm

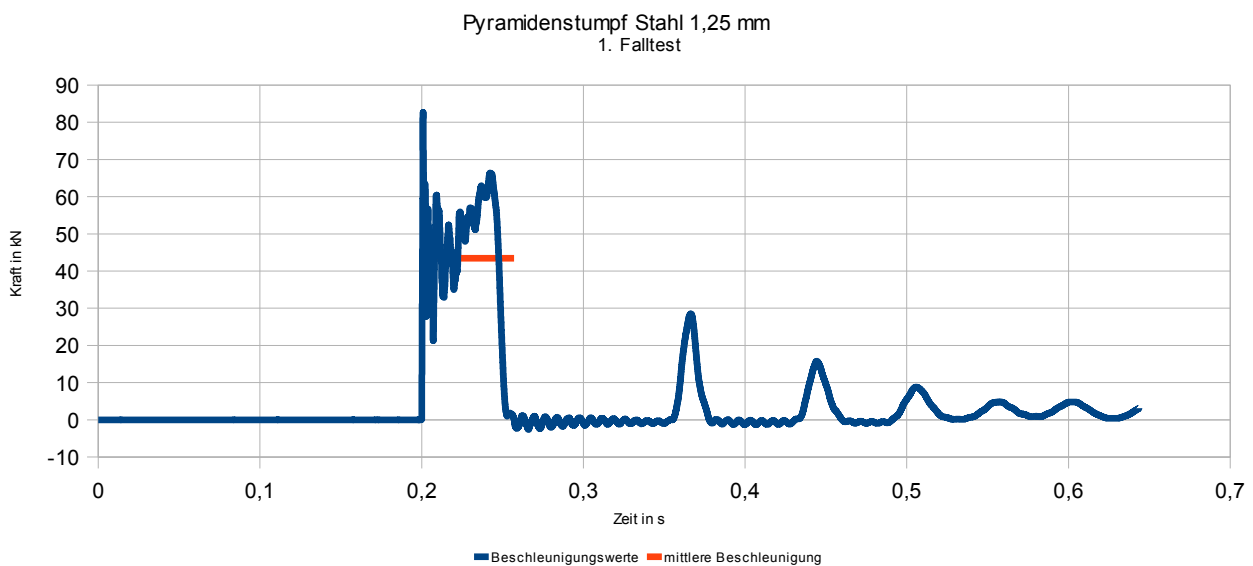


Abbildung 79: Graph mit Beschleunigungswerten je Zeiteinheit

Maximale Beschleunigung

Es wurden Spitzenwerte von $F=82,66\text{kN}$ im Crashtest erreicht. Es ergibt sich eine Spitzenbeschleunigung von:

$$a_{\text{Spitzenwert}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Spitzenwert}} = \frac{82660\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Spitzenwert}} = \underline{27,09\text{g}}$$

Damit wurden die maximal zulässigen $a_{\text{Spitzenwert_zulässig}}=40\text{g}$ nicht überschritten.

Mittlere Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigungskraft beträgt $F= 43,85\text{kN}$. Die mittlere Beschleunigung beträgt somit:

$$a_{\text{Mittelwert}} = \frac{F}{m_{\text{Mess}} \cdot g} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \frac{43.470\text{N}}{311\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad a_{\text{Mittelwert}} = \underline{14,25\text{g}}$$

Die maximal zulässige mittlere Beschleunigung von $a_{\text{Mittelwert_zulässig}}=20\text{g}$ wurde nicht überschritten. Somit werden alle vom Regelwerk gegeben Werte eingehalten.

Analyse der Ergebnisse vom Falltest

In der Simulation erreicht diese Crashboxeinheit Spitzenbeschleunigungswerte von $a_{\text{Spitzenwert_Simulation}}=27,57\text{g}$ und während des Falltest einen Wert von $a_{\text{Spitzenwert}}=27,09\text{g}$. Die Werte für die mittlere Beschleunigung sind nach Simulation $a_{\text{Mittelwert_Simulation}}=14,94\text{g}$ und nach dem Falltest $a_{\text{Mittelwert}}=14,25\text{g}$. Damit konnten die Simulationsergebnisse durch den Falltest bestätigt werden.



Abbildung 80: Vollständige Verformung nach Test- Draufsicht

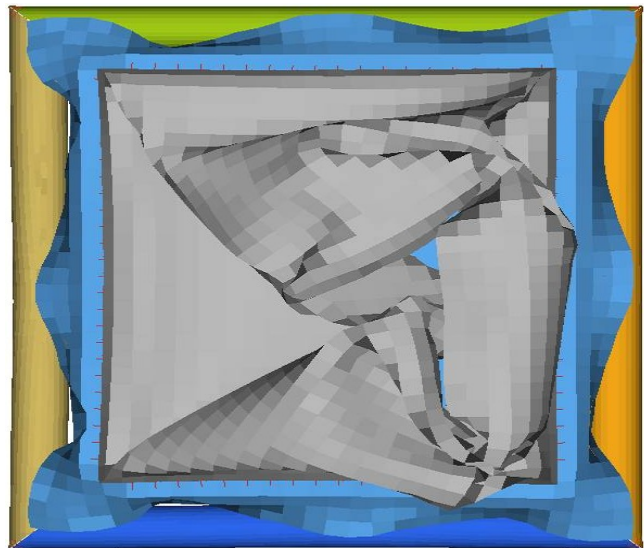


Abbildung 81: Vollständige Verformung laut Simulation- Draufsicht

Die Abbildungen 80 und 81 zeigen die Crashboxeinheit nach dem Test im direkten Vergleich zum simulierten Modell. Die Genauigkeit der Simulation im Vergleich zum Test ergibt sich aus dem Materialverhalten von allgemeinem Baustahl S235JR. Der verwendete Baustahl S235JR ist sehr gut schweißbar und es entstehen sehr gleichmäßige homogene Schweißnähte. Dadurch verformt sich die Box beim Test gleichmäßig.

5.3 Auswahl der zu bevorzugenden Crashbox-Variante

Nachdem die Falltests mit den in Frage kommenden Boxen durchgeführt wurden, folgt die Entscheidung, welche Box im Rennauto verbaut wird.

Die zu Bewertung herangezogenen Kriterien sind Masse, Spitzenbeschleunigung und mittlere Beschleunigung. Die Crashbox mit besten Wert erhält 4 Punkte, mit abnehmender Qualität der Eigenschaften wird jeweils 1 Punkt weniger vergeben. In Summe können 12 Punkte erreicht werden. Die Crashbox mit der höchsten Gesamtpunktzahl ist die Variante, welche am Rennfahrzeug verbaut wird.

Tabelle 3: Bewertung der Masse

Nr.	Bauform	Material	Materialstärke t in mm	Masse m in kg	Punkte
1	Quader	S 235 JR	1	1,59	3
2	Quader	Al Mg3	2	1,3	4
3	Pyramidenstumpf	S 235 JR	1,25	2,293	1
4	Pyramidenstumpf	Al Mg3	2	1,965	2

Tabelle 4: Bewertung der Spitzenbeschleunigung

Nr.	Bauform	Material	Materialstärke t in mm	Spitzenbeschleunigung $a_{\text{Spitzenbeschleunigung}}$ in g	Punkte
1	Quader	S 235 JR	1	136,24	0
2	Quader	Al Mg3	2	135,78	0
3	Pyramidenstumpf	S 235 JR	1,25	27,09	4
4	Pyramidenstumpf	Al Mg3	2	35,7	3

Tabelle 5: Bewertung der mittleren Beschleunigung

Nr.	Bauform	Material	Materialstärke t in mm	Mittlere Beschleunigung $a_{\text{Mittelwert}}$ in g	Punkte
1	Quader	S 235 JR	1	21,34	0
2	Quader	Al Mg3	2	21,01	0
3	Pyramidenstumpf	S 235 JR	1,25	14,25	4
4	Pyramidenstumpf	Al Mg3	2	16,33	3

Tabelle 6: Auswahl der zu bevorzugenden Variante

Nr.	Punkte Tabelle 3	Punkte Tabelle 4	Punkte Tabelle 5	Gesamtpunktzahl	Ergebnis
1	3	0	0	3	X
2	4	0	0	4	X
3	1	4	4	9	✓
4	2	3	3	8	

Wie in Tabelle 6 ersichtlich sind die Crashboxen Nr.1 und Nr.2, in der Bauform Quader, aufgrund der hohen Beschleunigungswerte nicht für den Einbau in ein Rennfahrzeug geeignet, da die Anforderungen des Regelwerks nicht erfüllt wurden. Auf Grundlage der Ergebnisse der Crashtests, wurde entschieden, keine weitere Crashboxeinheit in der Bauform Quader zu testen.

Nr. 3 und Nr.4 sind Varianten die als Crashboxeinheit für ein Rennfahrzeug in Frage kommen.

Entsprechend der in Tabelle 3 aufgeführten Ergebnisse, ist die Crashboxeinheit in Bauform Pyramidenstumpf aus Stahl S235JR die zu favorisierende Variante.

6. Zusammenfassung

Diese vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konstruktion einer Crashbox für einen Rennwagen der internationalen Rennserie Formula Student. Neben den Anforderungen des Regelwerkes, welches Größe und einzuhaltende Beschleunigungswerte beinhaltet, war es Ziel eine leichte und kosteneffiziente Variante einer Crashbox zu konstruieren. Die Funktionssicherheit wurde mit einer Simulation und anschließendem Falltest gewährleistet. Die Ergebnisse der Vorauswahl und Test zeigen, dass eine Crashbox in Bauform Pyramidenstumpf aus allgemeinem Baustahl S235 JR und einer Materialstärke von $t=1,25\text{mm}$ die zu bevorzugende Variante ist. Zwar ist diese Variante nicht die leichteste, erreichte aber in Simulation und Test die besten Beschleunigungswerte und ist in der Herstellung die einfachste Form. Alternativ kann eine Crashbox aus Aluminiumblech in gleicher Bauform genutzt werden. Allerdings ist hier eine leichte Abweichung zwischen Simulation und Test zu erkennen. Aluminiumblech lässt sich weniger gut verschweißen als Stahlblech. Andere Materialien wie Aluminiumschaum, Wabenstrukturen aus Aluminium, Kunststoffschäume und Carbon- und Aramidgewebe sind ebenfalls geeignet. Allerdings sind diese Werkstoffe sehr kostenintensiv oder ergeben zu große Crashboxen.

Formula Student- Regelwerk**B 3. 20 Impact Attenuator- Crashbox**

- B 3.20.1 Die Crashbox muss
- vor dem Bulkhead angebracht sein.
 - mindestens 200 mm (7.8 inch) lang, mit seiner Länge orientiert an der vorderen Achsen des Rahmens.
 - mindestens 100mm(3.9in) hoch und 200mm(7.8 in) breit mit einem Mindestabstand von 200 mm (7.8in) vor dem vorderen Bulkhead.
 - so, dass es den Bulkhead im Falle eines Unfalls nicht durchdringt.
 - sicher und direkt am vorderen Bulkhead angebracht und darf kein Teil der Verkleidung sein.
- B3.20.2 Die Befestigung der Crashbox muss so konstruiert sein, dass ein ausreichender Kraftfluss bei seitlichen und vertikalen Kräften im Falle eines nicht mittigen bzw. schrägen Einschlägen gewährleistet wird.
- B3.20.3 Die Befestigung der Crashbox an einem Monocoque bedingt eine geprüfte „Festigkeitsanalyse“, wie im Punkt B3.8, die zeigt, dass 4 M8 Schrauben mit Festigkeitsklasse 8.8 (5/16 inch Grat 5) vergleichbar sind.
- B3.20.4 An allen Autos, muss eine 1,5 mm(0.06 inch) Stahl- oder 4mm (0.157 inch) Aluminium- „Anti Eindringungs -Platte“ in die Crashbox-Einheit integriert sein.
Wenn die Platte geschraubt ist, muss sie die gleiche Größe haben, wie die äußeren Abmessungen des Bulkheads.
Wenn die Platte angeschweißt wird, muss sie bis zur Mittellinie der Bulkheadrohre gehen.
- B3.20.5 Wenn die Platte nicht im Rahmen integriert ist ,d.h geschweißt, dann muss sie mit mindestens 4 M8-Schrauben mit Festigkeitsklasse 8.8 (5/16 inch Grat 5) am vorderen Bulkhead befestigt werden.
- B3.20.6 Alternative Konstruktionen der Platte aus Artikel B.3.20.4 , die nicht den Minimalanforderungen entsprechen benötigen eine geprüfte Festigkeitsanalyse, wie im Punkt B3.8 beschrieben.
- B3.21 Benötigte Crashbox- Daten**
- B3.21.1 Das Team muss Testdaten vorlegen, die zeigen das ihre Crashbox, wenn sie an der Front des Autos angebracht ist mit einer gesamten Maße von 300 kg (661 lbs) und gecrashed in eine massive, nicht nachgebende Prallfläche mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 7.0 m/s (23 ft/sec), dürfen die Beschleunigungswerte 20 g in Mittelwert und 40 g in der Spitze nicht überschreiten.

- B3.21.2 Es müssen die Rohdaten zur Berechnung der Durchschnittsverzögerung benutzt werden. Die Spitzenbeschleunigung kann an Hand der Rohdaten bewertet werden. Wenn Spitzenwerte über 40g auftreten, kann ein Kanal-Filter Klasse 60 (100Hz) entsprechend SAE Empfehlung J211 „Instrumente für Crashtest“, oder ein 100 hHz, 3. Anforderung, Tiefpass-Butterworth-Filter (-3dB bei 100Hz) genutzt werden.
- B3.21.3 Der Test muss mit Fotos vor und nach dem Test, sowie der Testmethode nachgewiesen werden.
- B3.21.4 Das Testobjekt muss während der technischen Abnahme gezeigt werden um mit den Fotos vergleichen zu können und die Crashbox muss am Fahrzeug angebracht sein.
- B3.21.5 Die Testdaten und Berechnungen müssen im Adobe Acrobat ® Format (*.pdf) zu der Adresse und zum Zeitpunkt der auf der dem Event entsprechenden Website angegebenen Deadline übermittelt werden. Es muss eine Datei (Text, Zeichnung, Daten usw.) sein.
- B3.21.6 Die Daten müssen wie folgt benannt werden:
Startnummer_Schulname_Eventbezeichnung_IAD.pdf Bsp:
32_UAS_Mittweida_FSG_IAD.pdf
Eventbezeichnung zu finden in Regel A. 2.6
- B3.21.7 Teams die ihre Daten nach der Deadline übermitteln bekommen eine 10-Punkte-Strafe pro Tag.
Maximale Strafe sind 50 Punkte.
- B3.21.8 Die Unterlagen werden bewertet und werden beim Design Event dazu addiert.

FSG 3.1 Crashbox

FSG 3.1.1 Anti- Eindringungsplatte (Spezielle FSG-Änderung zur FSAE ® 2010 Regel B14.2)

An allen Autos, muss eine 1,5 mm (0.06 inch) Stahl- oder 4mm (0.157 inch) Aluminium- „Anti Eindringungs -Platte“ in die Crashbox-Einheit integriert sein. Andere Materialien sind verboten.

FSG 5.2 Crashboxdaten

Alle Teams müssen den FSG-IAD-Bericht mit dem in den FSG-Regeln angehängten Anhang A-B übermitteln. Dazu gehören, Beschreibung des Testaufbau und Ausrüstung, Fotodokumentation vor und nach dem Test und technische Zeichnungen. Die Daten müssen innerhalb der Deadline übermittelt werden

Literaturverzeichnis:

[1] SAE International, 2010 Formula SAE Rules.

URL: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2010fsaerules.pdf> ,

verfügbar am 10.10.2009

[2] Formula Student,

URL: <http://www.formulastudent.com/Libraries/Documents/IAReportGrading.sflb.ashx> ,

verfügbar am 10.10.2009

[3] Formula Student Germany,

URL: http://www.formulastudent.de/uploads/media/FSG_RULES_2010_ver1.03.pdf ,

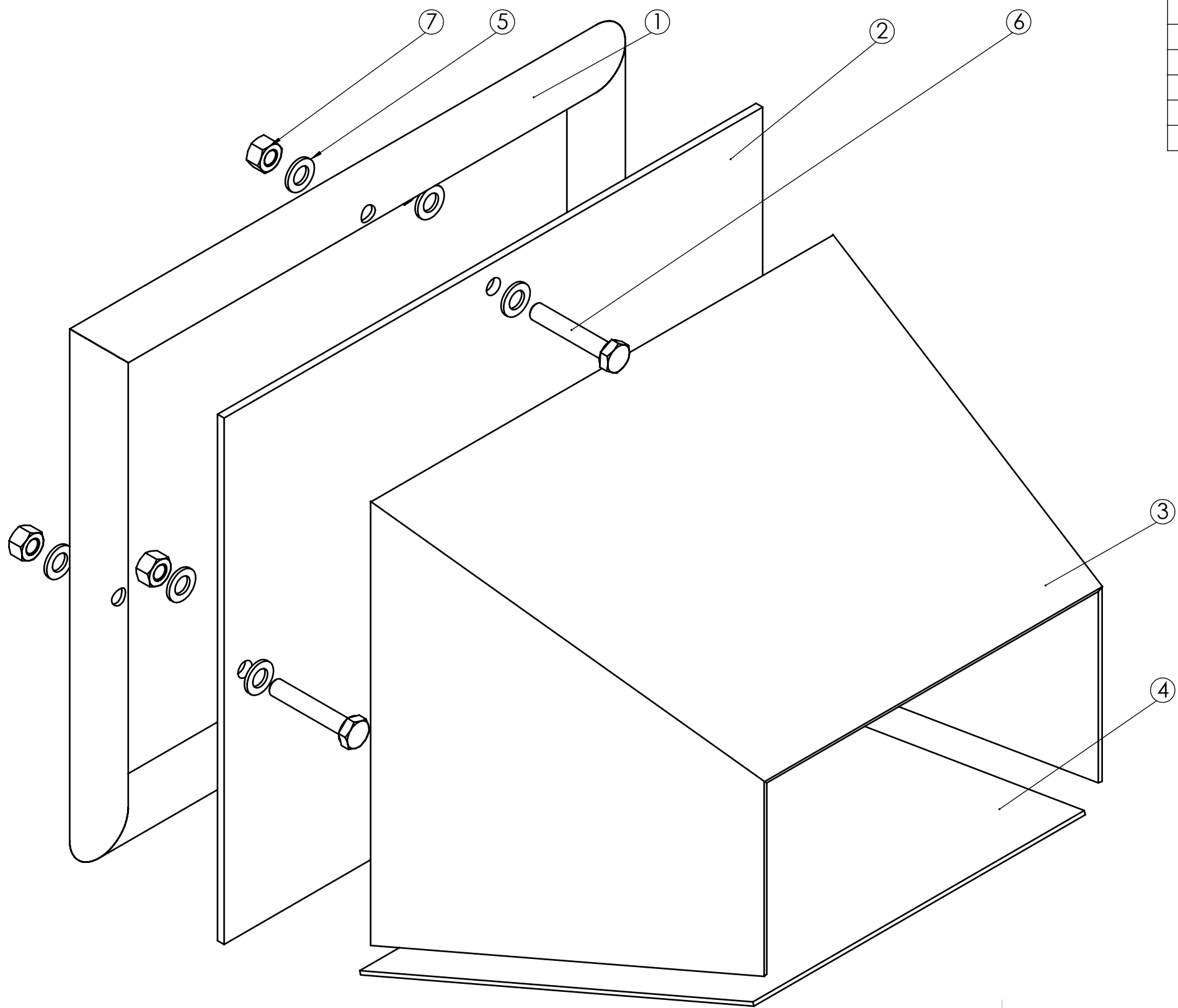
verfügbar am 10.10.2009

[4] Trzesniowski, Michael: Rennwagentechnik- Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme
1.Auflage, Verlag Vieweg+Teubner/ GWV Fachverlage, Wiesbaden; 2008

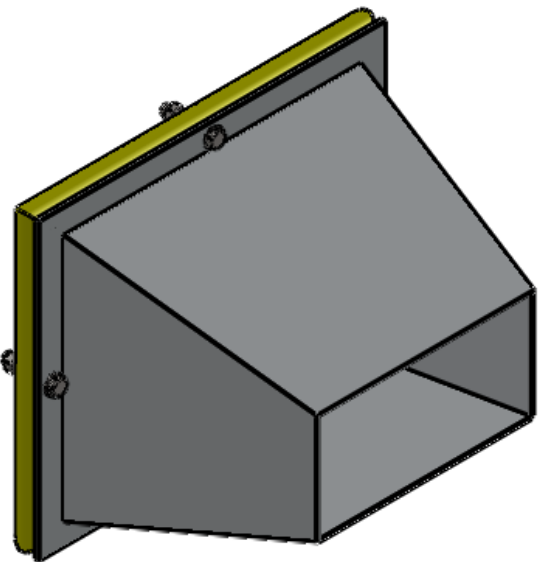
[5] Robert Bosch GmbH: Kraftfahrzeugtechnisches Taschenbuch,

26.Auflage, Friedrich Vieweg+ Sohn Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden; 2007

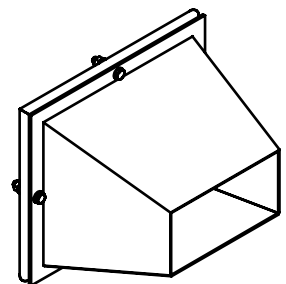
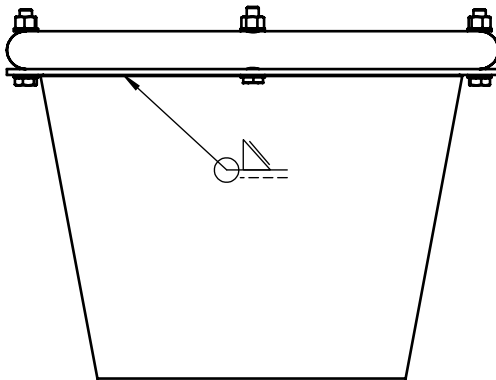
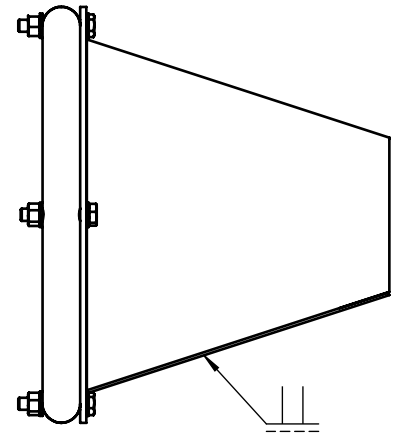
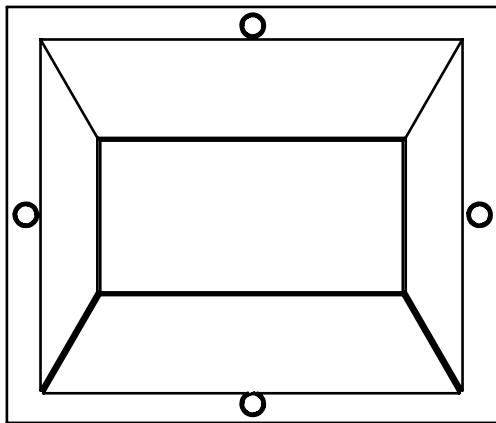
[6] Hoischen, Hans: Technisches Zeichnen- Grundlagen, Normen, Beispiele, Darstellende
Geometrie, 29.Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin; 2003



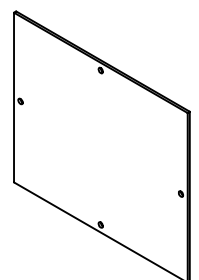
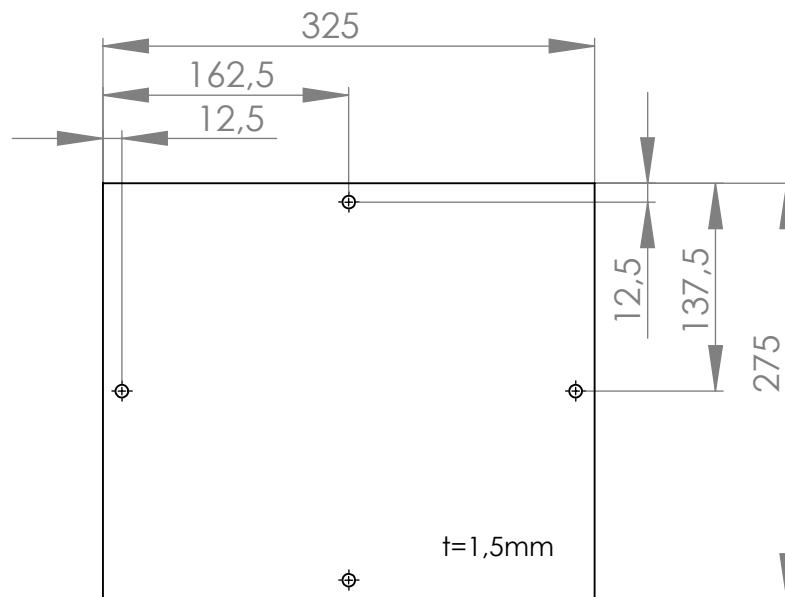
POS-NR.	Teil	Anzahl
1	Bulkhead	1
2	Al-Platte Stahl	1
3	Verformungskörper	1
4	Crashbox Unterteil	1
5	U-Scheibe DIN 126 - 9	9
6	Schraube M8 x 45 - ISO 4017	4
7	Mutter M8 - ISO 4034	4



(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
				Klasse DIN ISO 2768		(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)					
					Datum	Name		Crashboxeinheit Stahl Bauform: Pyramidenstumpf			
				Bearb.	22.02.10	Lischke					
				Gepr.							
				Norm							
								02-23-04-00			
				Hochschule				Blatt 1			
				Mittweida				Blätter 6			
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:			Ersatz durch:	

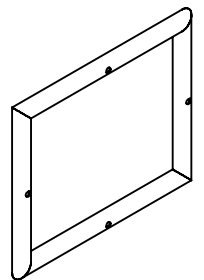
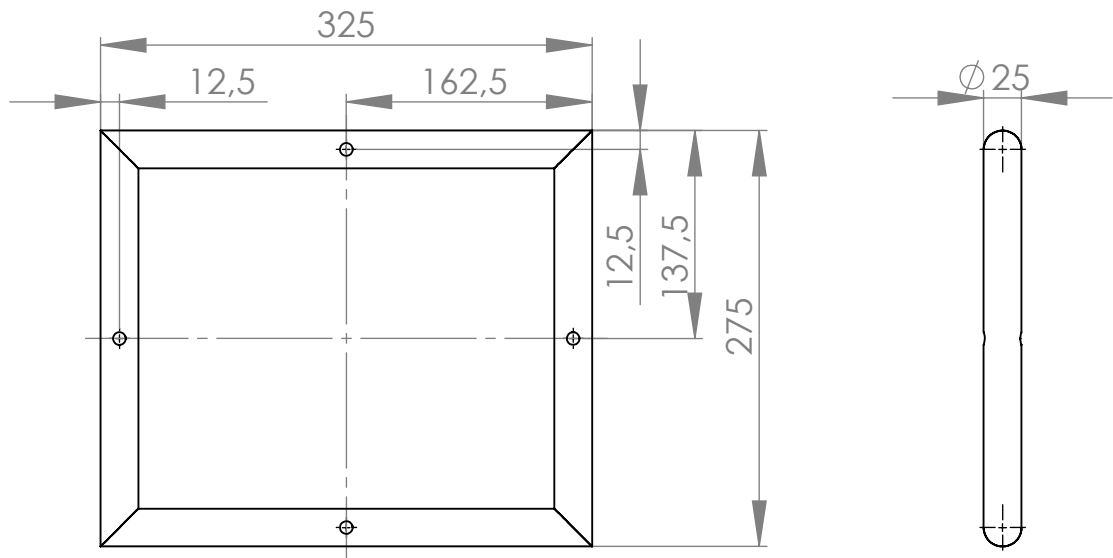


(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)		Maßstab 1:5		(Gewicht)	
								(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)			
				Crashboxeinheit Stahl Bauform Pyramidenstumpf Schweißzeichnung							
					Datum	Name					
				Bearb.	22.02.10	Lischke					
				Gepr.							
				Norm							
				Hochschule 		02-23-04-SZ				Blatt 2	
										Mittweida	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:		



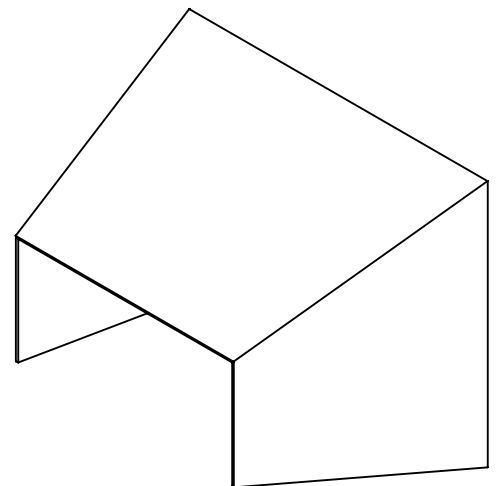
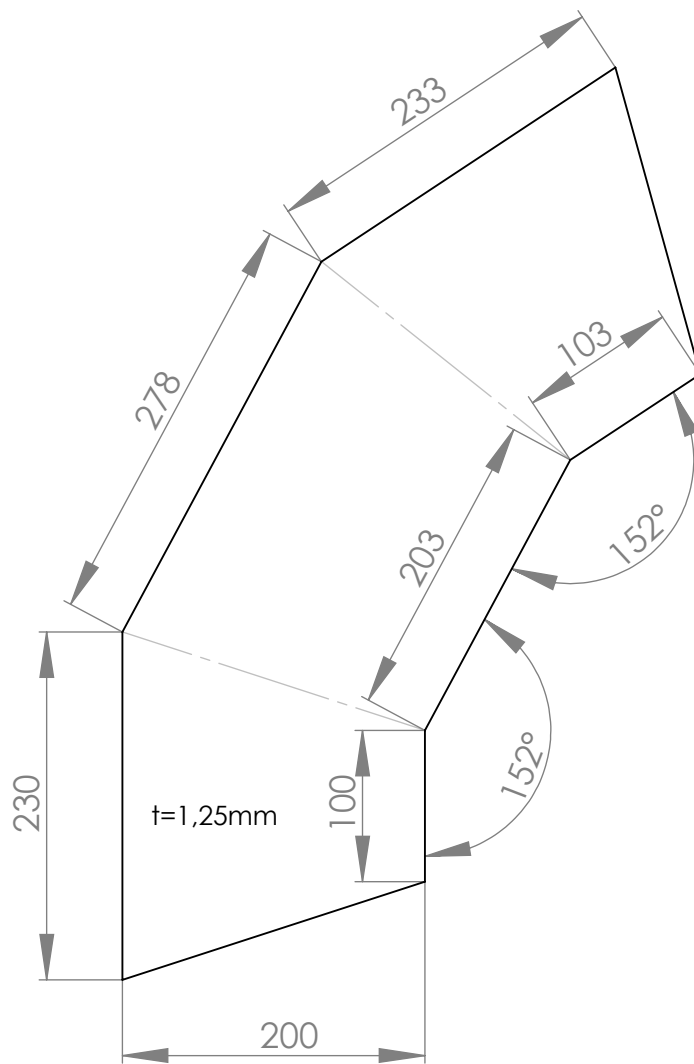
Alle Bohrungen: 8,4mm

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768m		(Oberfl.)		Maßstab 1:5		(Gewicht)	
								(Werkstoff Halbzeug) S235JR		(Rohteil-Nr.) --	
								(Modell- oder Gesenk-Nr.) --			
					Datum	Name		Al-Platte Stahl			
				Bearb.	22.02.10	Lischke					
				Gepr.							
				Norm							
				Hochschule 				02-23-04-01			
				Mittweida							
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung		beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:	
										Blatt 3	
										Blätter 6	



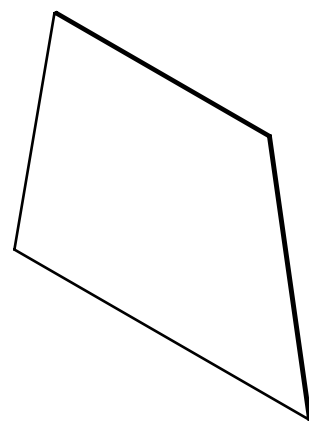
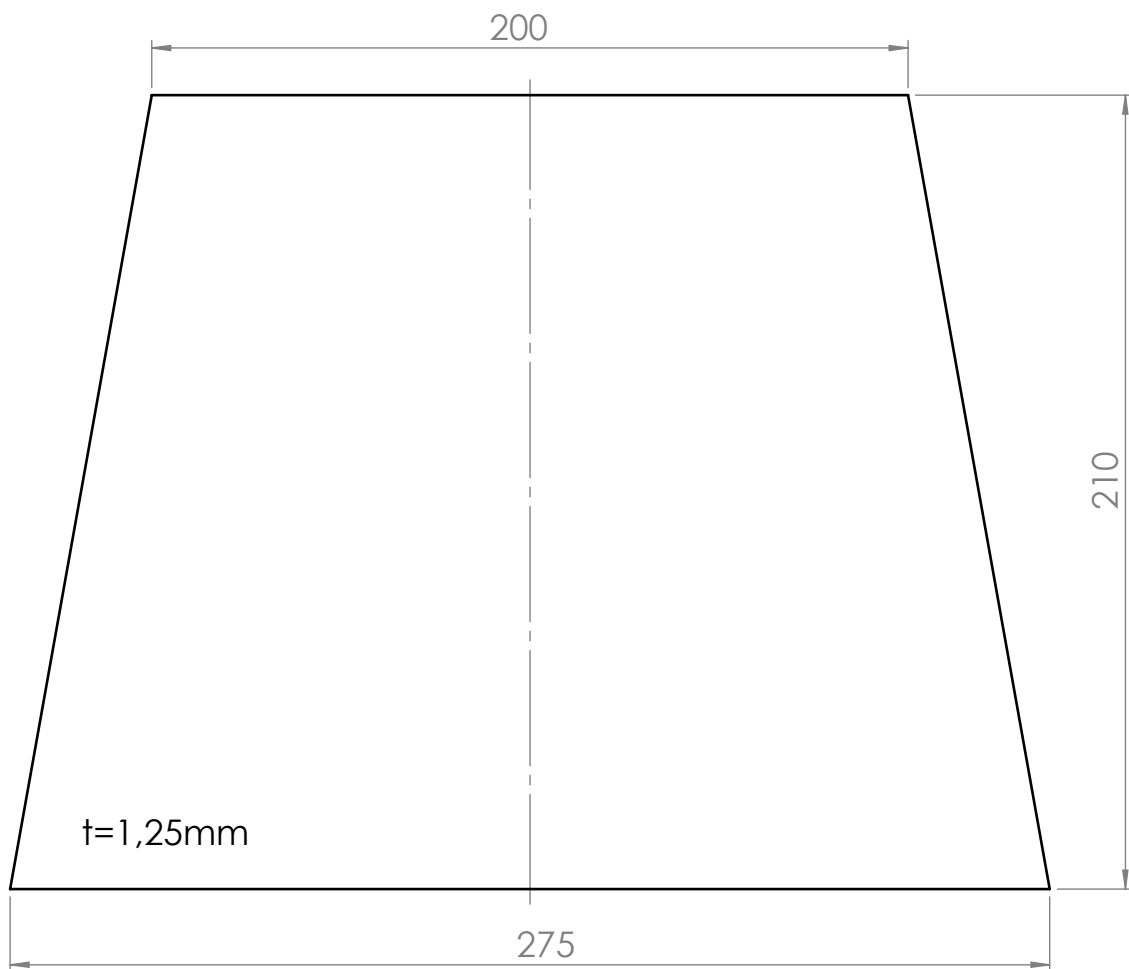
Alle Bohrungen: 8,4mm

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768f		(Oberfl.)		Maßstab 1:5		(Gewicht)		
								(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)		S235JR		
					Datum	Name		Bulkhead				
				Bearb.	22.02.10	Lischke						
				Gepr.								
				Norm								
				Hochschule 				02- 21 -01			Blatt 4	
											Mittweida	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:			Ersatz durch:		



Alle Biegekanten: 90°

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse DIN ISO 2768		(Oberfl.)		Maßstab 1:5		(Gewicht)	
								(Werkstoff Halbzeug) S235JR		(Rohteil-Nr.)	
								(Modell- oder Gesenk-Nr.)		Crashboxeinheit Stahl Bauform: Pyramidenstumpf Verformungskörper	
					Datum		Name				
				Bearb.	22.02.10		Lischke				
				Gepr.							
				Norm							
				Hochschule Mittweida				02-23-04-02		Blatt 5	
										Blätter 6	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:		



(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
				Klasse DIN ISO 2768				(Werkstoff Halbzeug) S235JR			
								(Rohteil-Nr.)			
								(Modell- oder Gesenk-Nr.)			
					Datum	Name		Crashboxeinheit Stahl Bauform: Pyramidenstumpf Unterteil			
				Bearb.	22.02.10	Lischke					
				Gepr.							
				Norm							
				Hochschule Mittweida				02-23-04-03			
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:			Ersatz durch:		